目　录

第1章　MATLAB基础

1.1　MATLAB介绍

MATLAB是一种科学计算软件。MATLAB是Matrix Laboratory（矩阵实验室）的缩写，这是一种以矩阵为基础的交互式程序计算语言。早期的MATLAB主要用于解决科学和工程的复杂数学计算问题。由于它使用方便、输入便捷、运算高效、适应科技人员的思维方式，并且有绘图功能，有用户自行扩展的空间，因此特别受到用户的欢迎，使它成为在科技界广为使用的软件，也是国内外高校教学和科学研究的常用软件。

MATLAB由美国Mathworks公司于1984年开始推出，历经升级，到2001年已经有了6.0版，现在MATLAB 6.1、6.5、7.0版都已相继面世。早期的MATLAB在DOS环境下运行，1990年推出了Windows版本。1993年，Mathworks公司又推出了MATLAB的微机版，充分支持在Microsoft Windows界面下的编程，它的功能越来越强大，在科技和工程界广为传播，是各种科学计算软件中使用频率最高的软件。

MATLAB比较易学，它只有一种数据类型（即64位双精度二进制），一种标准的输入输出语句，它用解释方式工作，不需要编译，一般入门后经过自学就可以掌握。如果有不清楚的地方，可以通过它的帮助（help）和演示（demo）功能得到启示。学习MATLAB的难点在于，它有大量函数，这些MATLAB函数仅基本部分就有700多个，其中常用的有200～300个，掌握和记忆起来都比较困难。

1993年出现了SIMULINK，这是基于框图的仿真平台，SIMULINK挂接在MATLAB环境上，以MATLAB的强大计算功能为基础，以直观的模块框图进行仿真和计算。SIMULINK提供了各种仿真工具，尤其是它不断扩展的、内容丰富的模块库，为系统的仿真提供了极大便利。在SIMULINK平台上，拖拉和连接典型模块就可以绘制仿真对象的模型框图，并对模型进行仿真。在SIMULINK平台上，仿真模型的可读性很强，这就避免了在MATLAB窗口使用MATLAB命令和函数仿真时，需要熟悉记忆大量M函数的麻烦，对广大工程技术人员来说，这无疑是最好的福音。现在的MATLAB都同时捆绑了SIMULINK，SIMULINK的版本也在不断地升级，从1993年的MATLAB 4.0/SIMULINK 1.0版到2001年的MAT-

LAB 6.1/SIMULINK 4.1 版，2002 年即推出了 MATLAB 6.5/SIMULINK 5.0 版。MATLAB 已经不再是单纯的“矩阵实验室”了，它已经成为一个高级计算和仿真平台。

SIMULINK 原本是为控制系统的仿真而建立的工具箱，在使用中易编程、易拓展，并且可以解决 MATLAB 不易解决的非线性、变系数等问题。它能支持连续系统和离散系统的仿真，支持连续离散混合系统的仿真，也支持线性和非线性系统的仿真，并且支持多种采样频率（Multirate）系统的仿真，也就是不同的系统能以不同的采样频率组合，这样就可以仿真较大、较复杂的系统。因此，各科学领域根据自己的仿真需要，以 MATLAB 为基础，开发了大量的专用仿真程序，并把这些程序以模块的形式都放入 SIMULINK 中，形成了模块库。SIMULINK 的模块库实际上就是用 MATLAB 基本语句编写的子程序集。现在 SIMULINK 模块库有三级树状的子目录，在一级目录下就包含了 SIMULINK 最早开发的数学计算工具箱、控制系统工具箱的内容，之后开发的信号处理工具箱（DSP Blocks）、通信系统工具箱（Comm）等也并行列入模块库的一级子目录，逐级打开模块库浏览器（SIMULINK Library Browser）的目录，就可以看到这些模块。

从 SIMULINK 4.1 版开始，有了电力系统模块库（Power System Blockset），该模块库主要由加拿大 HydroQuebec 和 TECSIM International 公司共同开发。在 SIMULINK 环境下用电力系统模块库的模块，可以方便地进行 RLC 电路、电力电子电路、电机控制系统和电力系统的仿真。本书中电力电子和电力拖动控制系统的仿真就是在 MATLAB/SIMULINK 环境下，主要使用电力系统模块库和 SIMULINK 两个模块库进行。通过电力电子电路和电机控制系统的仿真，不仅展示了 MATLAB/SIMULINK 的强大功能，并且可以学习控制系统仿真的方法和技巧，研究电路和系统的原理和性能。由于 SIMULINK 和 MATLAB 的密切依存关系，在介绍 SIMULINK 之前，必须首先介绍 MATLAB。MATLAB 的一些基本命令和函数，尤其是 MATLAB 的绘图功能，是在电力电子电路和电力拖动控制系统的仿真中要经常使用的。但是本书主要是介绍电力电子电路和电力拖动控制系统的仿真，因此对 MATLAB 只介绍与本书有关的内容。MATLAB 功能强大，有关 MATLAB 的书刊已经很多，对 MATLAB 更深入的要求，可以阅读其他介绍 MATLAB 的书籍。

现在因特网上有大量的 MATLAB 资源，如有关 MATLAB 的新消息，免费的工具箱下载，有关 MATLAB 的讨论和讲座等，读者可以进入这些网站，以获取更多的信息。有关 MATLAB 的网站很多，下面列举部分网站供读者参考，其中包括 http://matlab.netsh.net、http://www.mathworks.com、http://mathtools.net、http://matlab.myrice.com（MATLAB 大观园）、http://www.hirain.com（恒润科技，MATLAB 国内代理）、http://matlab.netsh.net 等。

1.2 MATLAB 的安装和启动

MATLAB 6.1 版有两张光盘，将其中的 A 盘（程序盘）插入计算机的光驱，启动光驱，如果操作系统是 Windows 98 或 Windows 2000，系统会自动进入和运行安装程序，出现图 1-1 所示的 MATLAB 启动界面，并随后出现图 1-2 所示的安装对话框，按照对话框的提示，点击 Next 键，即可完成 MATLAB 的安装过程。在安装过程中，需要输入用户名称、公司及产品注册码等。在安装过程中，可以选择安装组件，如果计算机磁盘空间不足，可以减少一些暂时不用组件的安装。

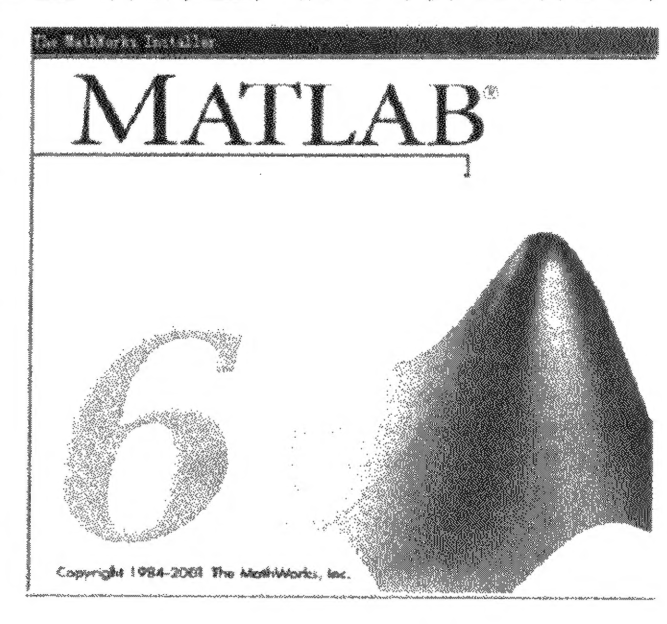


图 1-1　MATLAB 启动界面

在 MATLAB 安装结束时，可以选择“立即重新启动计算机”或“暂不重启计算机”。安装完成后，在 Windows 桌面上会自动生成 MATLAB 的快捷方式图标。

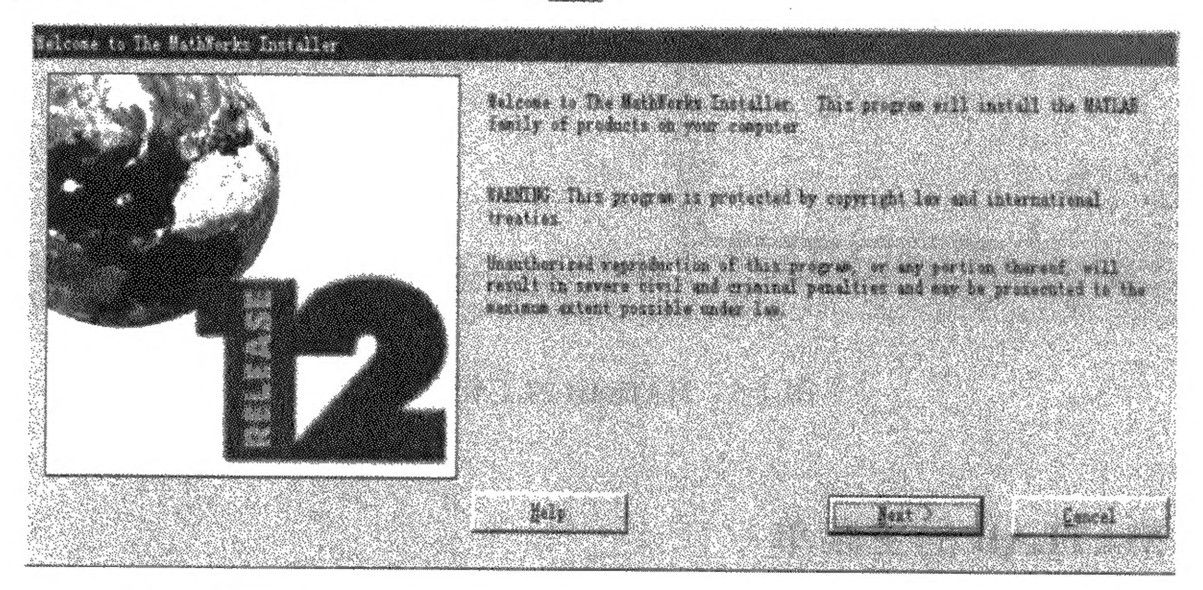


图 1-2　MATLAB 安装对话框

不同版本的 MATLAB 安装过程会略有差异，但大体是相同的。

1.3 MATLAB 环境

在桌面上双击 MATLAB 快捷方式图标，或者在开始菜单里点击 MATLAB 的选项，即可进入 MATLAB 环境。进入 MATLAB 环境，即打开了 MATLAB 窗口

（见图 1-3）。环境包括 MATLAB 标题栏、主菜单栏和常用工具栏。在默认显示状态时，在工具栏下有三个子窗口，左边上方窗口显示 MATLAB 联机说明书目录或工作间的内容，两者可以通过子窗口下方的 Launch Pad 和 Workspace 键切换。左边下方窗口将显示已执行的命令（Command History）。右方窗口是 MATLAB 的命令子窗口，这是 MATLAB 的主要工作窗口，在这个窗口中，在提示符“>>”后逐行输入 MATLAB 命令，回车后，命令就能立即得到执行。

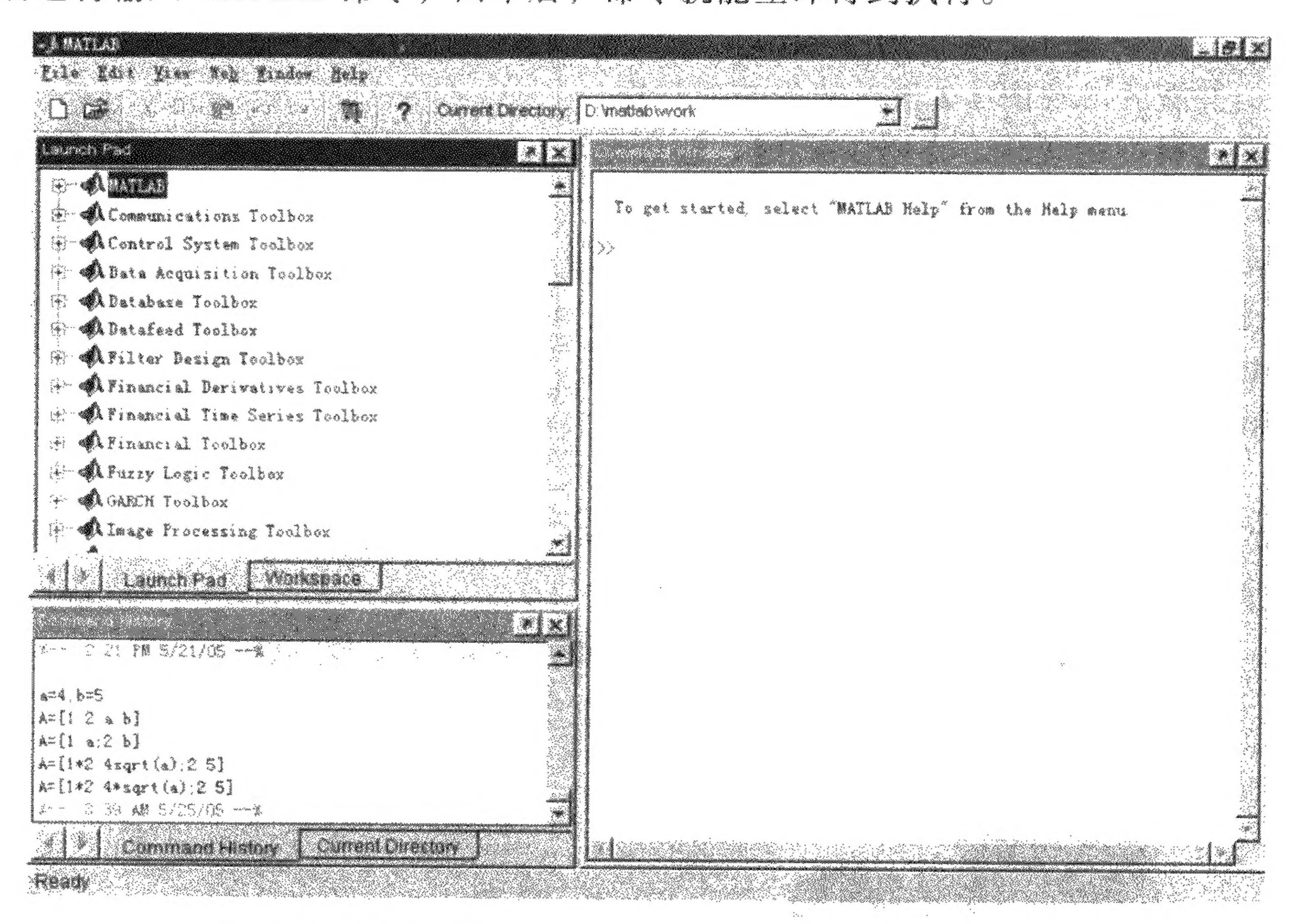


图 1-3　MATLAB 的工作环境

1.3.1　MATLAB 的主菜单

MATLAB 的主菜单有 File、Edit、View、Web、Window 和 Help 六项。点击菜单命令，就会显示下拉子菜单的内容。这些菜单的内容与其他应用程序的菜单区别不大，因此只选择一些主要内容进行说明。

1. File（文件）菜单

(1)“New”创建一个新文件，有三种文件，即“M-file”、“Figure”、“Model”可选。选择“Model”即可进入 SIMULINK 环境，以绘制仿真模型方式对电路和系统仿真，这是本书介绍的主要仿真方式。

(2)“Open”打开一个名为“work”的文件夹，这是 MATLAB 默认的保存文

件的地方。只要文件保存时没有另外指定文件保存的路径，MATLAB 系统就将文件保存在“work”文件夹中。

(3)“Close Commmand Window”，点击该项可以切换窗口显示。

(4)“Import Data”为打开 MATLAB “work”文件夹中带有 .mat 后缀的数据文件，并将数据放到工作间（Workspace）中备用。

(5)“Save workspace As …”为保存工作间（Workspace）中的数据。

(6)“Set Path …”为打开 MATLAB 的路径浏览器，搜索 MATLAB 所有文件的路径。

(7)“Preferences …”可以打开一个 MATLAB 的参数设置对话框，供用户改变工作环境的外观和相关操作的属性。

(8)“Print …”为打印。

2. Edit（编辑）菜单

Edit（编辑）菜单中包括了撤消（Undo）、恢复（Redo）、剪切（Cut）、复制（Copy）、粘贴（Paste）、特殊粘贴（Paste Special…）、全选（Select All）、清除（Delete）等命令，这些命令都要在选中目标后才能操作。另外还有窗口命令，其中包括清除命令窗口（Clear Command Window）显示的内容、清除历史命令（Clear Command History）窗口内容以及清空工作间（Clear Workspace）。

3. View（查看）菜单

View（查看）菜单中的命令主要用来改变桌面上 MATLAB 子窗口打开的个数和排列，如选择 Desktop Layout/Default 默认方式，则 MATLAB 的窗口就如图 1-3 所示，读者只要试验几次就知道了。

4. Web（万维网）菜单

Web（万维网）菜单保存了 Mathworks 公司的三个网址，点击其中之一，即可进入该公司的相应网站。

5. Window（视窗）菜单

用来查看 MATLAB 已经打开的窗口，并选择其中某一窗口或在不同窗口之间进行切换。

6. Help（帮助）菜单

Help（帮助）菜单用于打开 MATLAB 的帮助窗口，用鼠标点击窗口中的帮助主题或浏览器，可以得到帮助的内容。

1.3.2 MATLAB 的工具栏

在 MATLAB 的工具栏上有九个按钮，为用户提供了常用命令的快捷方式，其功能如下：

(1) 🗋 用于打开 MATLAB 的 M 文件（M-file）编辑器，用编辑器编辑一个 M

文件的新文件。

(2) 用于打开一个已经存在的文件，它的默认方式是打开 MATLAB work 文件夹中的模型文件。

(3) 用于将选中的文档剪切下来，并放到粘贴板上。

(4) 用于复制选定的文档，并放到粘贴板上备用。

(5) 用于将保存在粘贴板上的文档粘贴到指定的位置上。

(6) 用于撤消最近的一次操作。

(7) 用于恢复最近的一次操作。

(8) 用于打开 SIMULINK 模块库浏览器，进入 SIMULINK 仿真环境。

(9) 用于打开 MATLAB 帮助文件。

1.3.3 MATLAB 的命令窗口

MATLAB 的命令窗口（Command Window）是 MATLAB 的主要工作区，是人机对话的主要环境。在命令窗口中键入各种命令，可以得到相应的结果。图 1-4 所示为在命令窗口中键入了一个简单的代数计算式：$10.5+3\times4\times(2.1+3.4)/2$，回车后得到的计算结果是 43.5。关于 MATLAB 的命令和基本运算将在后面作相应的介绍。

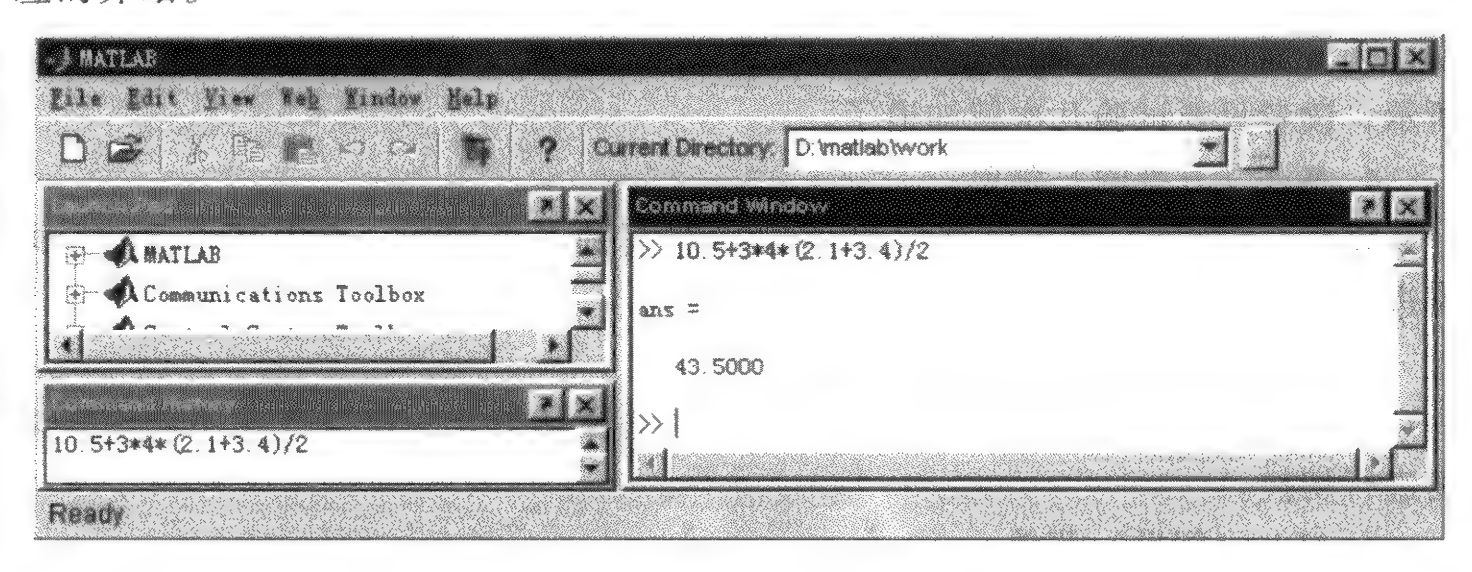


图 1-4 MATLAB 命令窗口

1.3.4 MATLAB 的工作间

MATLAB 的工作间（Workspace）是暂时存放 MATLAB 命令或程序的运行结果，以及程序（或命令）中出现的常数和变量的一个空间。在进入 MATLAB 环境时，MATLAB 工作间（Workspace）就自动同时打开。在运行 MATLAB 程序时，

程序中的变量就会存放到工作间中，程序运行的结果也以变量的形式保存在工作间中。

工作间的变量可以在窗口中看到，也可以用命令 who 或 whos 查看当前工作间中的所有变量。其中，命令 who 只给出变量名，命令 whos 不仅给出变量名，还同时给出变量的大小和数据类型。用命令 clear 可以清空工作间中的变量和数据。如图 1-5 所示，右边窗口给出 A、A1、A2 三个变量的赋值，最后用命令 who 查看工作间的变量。将左上窗口切换到 “Workspace”，通过此窗口可以显示工作间的变量及变量大小和类型。在左下窗口则给出了在命令窗口中已经执行过的历史命令。

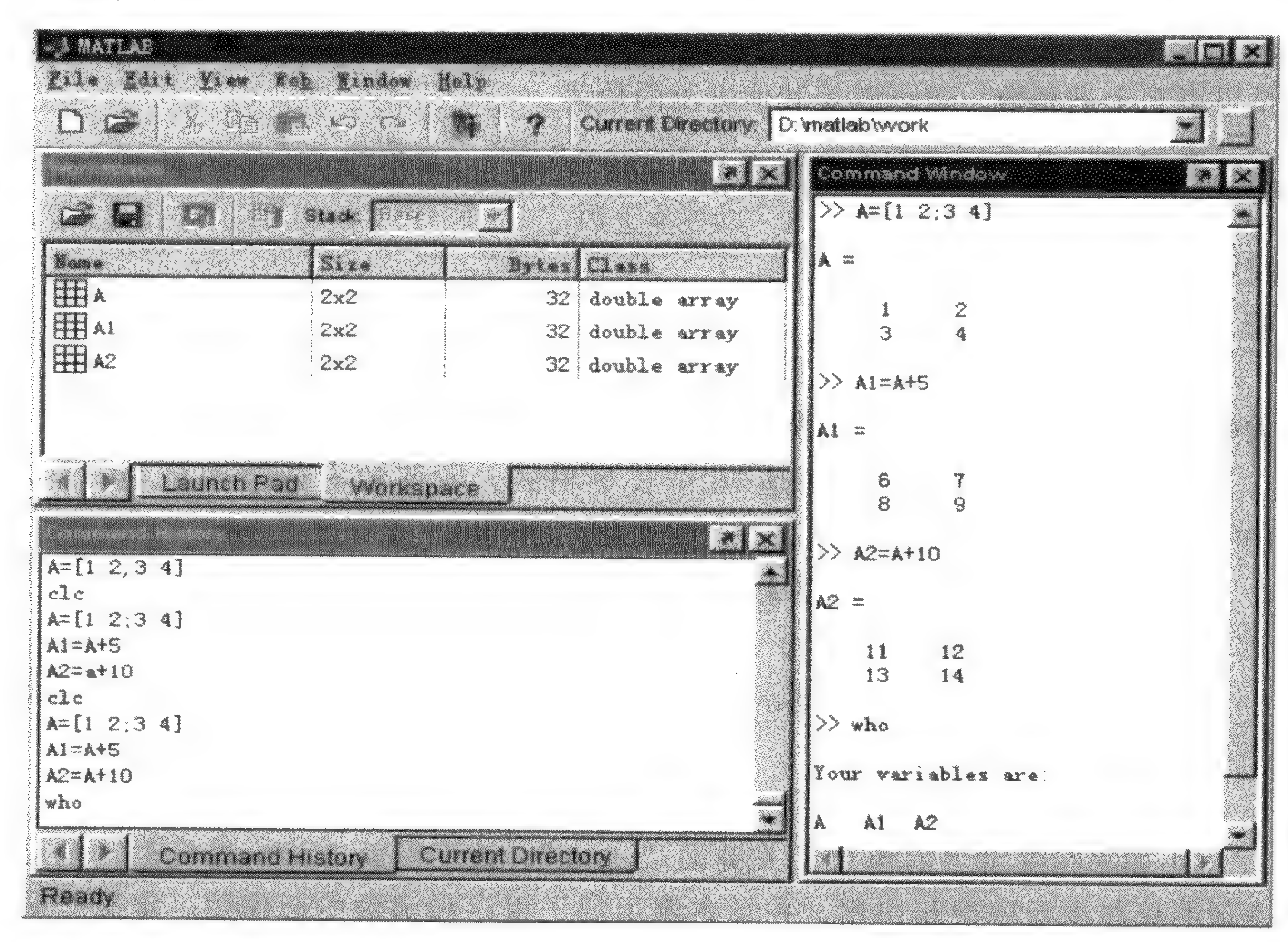


图 1-5　通过窗口和命令查看工作间变量

工作间中的变量和数据可以用 “File” 菜单中的 “Save Workspace As …” 命令进行保存。

1.4 MATLAB 的计算基础

MATLAB 的计算主要是数组和矩阵的计算，并且定义的数值元素是复数，这

是 MATLAB 的重要特点。函数是计算中必不可少的，MATLAB 函数的变量不需要事先定义，它以在命令语句中首次出现而自然定义，这在使用中很方便。使用 MATLAB/SIMULINK 进行仿真，MATLAB 的计算大部分已经模块化了，但是掌握一些必要的计算知识和定义还是很有必要的。

1.4.1 常量和变量

MATLAB 数值计算的数据有常量和变量两种，变量和常量都可以用标识符来表示和辨别，这些标识符也就是变量名，变量在数值计算前必须先赋值。

(1) 常量。MATLAB 的常量有实数和复数两类，复数又有实部和虚部两部分，MATLAB 定义的数值元素是复数，因此实数是复数虚部为零的特殊情况。常量可以是十进制数，也可以是其他进制的数值。

在 MATLAB 中，虚数的单位为“i”（$\mathrm{i}=\sqrt{-1}$），复数的生成语句为

$$z = a + b\mathrm{i}$$

式中，a、b 为实数；z 为复数名。

或

$$z = \mathrm{r} * \exp(\theta * \mathrm{i})$$

式中，r 为复数的模；θ 为复数的辐角（rad)。

MATLAB 常数的存储格式是 16 位长型格式，数值的有效范围是 10^{-308} ~ 10^{+308}。

(2) 变量。MATLAB 变量的命名规则如下：

1) 变量名以英文字母开始，即首字符必须是 26 个英文字母之一。

2) 变量名可以由英文字母、数字和下划线组成，MATLAB 能区分字母的大小写。

3) 变量名长度不超过 31 个字符长度。

4) 如果在变量名前添加了关键词“global”，该变量就成为全局变量，全局变量不仅在主程序中起作用，并且在调用的子程序和函数中起作用。定义全局变量必须在主程序的首行，这是惯例。

MATLAB 有一些规定的常量和变量，这些常量和变量见表 1-1。

表 1-1 MATLAB 规定的常量和变量

常量和变量名	说　明
ANS(或 ans)	默认变量名，用于应答最近一次的操作、运算结果
i 或 j	虚数单位
pi	圆周率 π
eps	浮点数的相对误差

（续）

常量和变量名	说　明
realmax	最大的实正数
realmin	最小的实正数
INF(或 inf)	无穷大
NaN(或 nan)	表示不定值(即 0/0)
nargin	函数实际输入的参数个数
nargout	函数实际输出的参数个数

1.4.2 数组和矩阵的表示和赋值

数组是指按一定次序排列的数，矩阵是由 $m \times n$ 个数，按 m 行和 n 列排列而成的“表”。数组可以是一维的，也可以是 n 维的，因此一维数组可以看成是一行多列的矩阵，是矩阵的特殊情况，一般也称为行矢量，而一列多行的矩阵称为列矢量。n 维数组一般也就是矩阵了。单个的数或标量则可以看成是 1×1 的矩阵，所以数、数组都可以用矩阵表示，MATLAB 也以矩阵作为运算的基本单元。MATLAB 既支持数组的运算，也支持矩阵的运算，但是数组与矩阵的运算有很大的不同，数组的运算对数组中每个元素都执行相同的操作，而矩阵的运算则按线性代数的法则进行。

(1) 一维数组的表示和赋值。一维数组（行矢量）是用方括号括起的一组元素（或数)，元素之间用空格或逗号分隔，组成数组的元素可以是具体的数值、变量名或算式。举例如下：

x = [1 2 3 4 5 6]

x 为数组名，1、2、3、4、5、6 为组成数组的元素，元素之间以空格分隔。

y = [7,8,9,1 + 2i,3 + 4i]

数组元素包含复数，元素间以逗号分隔。

z = [1,2,3,a,b,c]

包含变量的数组，a、b、c 为变量名。

p = [pi,2 * pi,1.3 * sqrt(3),(1 + 2)/5 * 4]

以算式表示的数组。

(2) n 维数组和矩阵的表示和赋值。n 维数组或矩阵的表示和赋值的规则是矩阵或数组的元素列入方括号[]中，每行的元素间用空格或逗号分隔，行与行之间用分号或回车键隔开。举例如下，即

A = [1 2 3;4 5 6;7 8 9]

A 为矩阵名，方括号内表示一个 3×3 的矩阵。

矩阵内的元素可以是数值、变量或者表达式。如

B = [1,2, 3;a, b,(a + b)/2]

1.4.3 MATLAB 的算术运算

MATLAB 的算术运算符见表 1-2。

表 1-2 MATLAB 的算术运算符

算术运算符	说明	算术运算符	说明
+	加	\	矩阵左除
-	减	.\	数组左除
*	矩阵乘	/	矩阵右除
.*	数组乘	./	数组右除
^	矩阵乘方	'	矩阵转置
.^	数组乘方	.'	数组转置

1.4.4 MATLAB 的关系运算

所谓关系运算是指两个元素之间的比较,关系运算的结果只可能是 0 或 1。0 表示该关系式不成立,即为“假”;1 表示该关系式成立,即为“真”。MATLAB 的关系运算有六种,见表 1-3。

表 1-3 MATLAB 的关系运算符

关系运算符	说　明	关系运算符	说　明
= =	等于	<	小于
~ =	不等于	> =	大于等于
>	大于	< =	小于等于

1.4.5 MATLAB 的逻辑运算

逻辑量只有 0(假)和 1(真)两个值,逻辑量的基本运算有与(&)、或(|)和非(~)三种。有时也包括异或运算(xor),异或运算可以通过三种基本运算组合而成。基本逻辑运算的真值见表 1-4。

表 1-4 基本逻辑运算的真值表

逻辑运算	A = 0		A = 1	
	B = 0	B = 1	B = 0	B = 1
A&B	0	0	0	1
A|B	0	1	1	1
~A	1	1	0	0
xor(A,B)	0	1	1	0

1.4.6 MATLAB 的特殊运算符

MATLAB 有一些特殊运算符在命令和计算中使用，这些特殊运算符见表 1-5。要特别指出的是，这些特殊运算符在英文状态下输入有效，在中文状态下输入则无效。

表 1-5 MATLAB 的特殊运算符

特殊运算符	说明
:	冒号，输入行矢量，从矢量、数组、矩阵中取指定元素、行和列、大矩阵中取小矩阵
;	分号，用于分隔行
,	逗号，用于分隔列
()	圆括号，用于表示数学运算中的先后次序
[]	方括号，用于构成矢量和矩阵
{}	大括号，用于构成单元数组
.	小数点或域访问符
..	父目录
...	用于语句末端，表示该行未结束
%	用于注释
!	用于调用操作系统命令
=	用于赋值

1.4.7 MATLAB 常用的函数

MATLAB 的函数极为丰富，一些常用的数学函数见表 1-6。

表 1-6 MATLAB 常用的数学函数

分类	函数	说明	分类	函数	说明
三角函数	sin	正弦	三角函数	atan	反正切
	cos	余弦		atan2(x,y)	四象限反正切
	tan	正切		sinh	双曲正弦
	asin	反正弦		cosh	双曲余弦
	acos	反余弦		tanh	双曲正切
	sec	正割		asinh	反双曲正弦
	csc	余割		acosh	反双曲余弦
	cot	余切		atanh	反双曲正切
	asec	反正割		acot	反余切
	acsc	反余割		sech	双曲正割

（续）

分类	函数	说明	分类	函数	说明
三角函数	csch	双曲余割	复数	real	实部
	coth	双曲余切		imag	虚部
	asech	反双曲正割		conj	求共轭复数
	acsch	反双曲余割		isreal	是实数时为真
	acoth	反双曲余切		unwrap	去掉相角突变
指数函数	exp	以 e 为底的指数		cplxpair	安共轭复数对排序
	log	自然对数	取整函数	round	四舍五入取整数
	log2	以 2 为底的对数		fix	向 0 方向取整数
	log10	以 10 为底的对数		floor	向 $-\infty$ 方向取整数
	pow2	2 的幂		ceil	向 $+\infty$ 方向取整数
	sqrt	求平方根		sign	符号函数
	Nextpow2	求比输入数大而最近 2 的幂		rem(a,b)	a 整除 b,求余数
复数	abs	求绝对值和复数模		mod(x,m)	x 整除 m,取正余数
	angle	求相角			

1.5 MATLAB 程序设计基础

MATLAB 是一种解释性高级程序设计语言,对程序中的语言边解释边执行。MATLAB 与其他高级语言一样,是由顺序、选择和循环三种基本控制结构组成。MATLAB 语句包括表达语句、控制语句、调试语句和空语句等。控制语句还包括条件、循环和一些转移语句。MATLAB 的语句键入后按回车键即可执行,因此一般也把语句称为命令。

MATLAB 程序的基本结构如下,即

```
%  说明
清除命令
定义变量
逐行执行的命令
…  …
    循环和转移
    逐行执行的命令
    …  …
    end
逐行执行的命令
  …  …
```

1.5.1 表达式、表达式语句和赋值语句

1. 表达式

由运算符连接的常量、变量和函数就构成了 MATLAB 的表达式，因此在 MATLAB 中有算术表达式、函数表达式、关系表达式和逻辑表达式等。MATLAB 中的数组可以进行这四种运算，而矩阵只能进行前两种运算。

2. 表达式语句

单个的表达式就是表达式语句，一行可以只有一个表达式语句，也可以有多个表达式语句，这时语句间用分号(;)或逗号(,)分隔。语句以回车换行结束。以分号结束的语句执行后不显示运行结果，以逗号和回车键结束的语句执行后即显示运行结果。如果一条语句需要占用多行，这时需要使用连续符(…)。

3. 赋值语句

将表达式的值赋予变量就是赋值语句。

```
A = 3 + 7 * 8
x = 10 * sin(2 * pi * f * t)
z = 2 * x + 5 * y
```

1.5.2 流程控制语句

MATLAB 语句一般是逐条执行的，如果需要中途改变执行的次序，就需要流程控制语句。MATLAB 的流程控制语句有 if、while 和 for 三种。在 MATLAB 5.0 版后又增加了 switch - case 语句。

1.5.2.1 if 语句

if 语句有三种形式，分别为

if (表达式)，语句组 A，end

if (表达式)，语句组 A，else 语句组 B，end

if (表达式 1)，语句组 A，else if (表达式 2) 语句组 B，else 语句组 C，end

三种形式都以"if"开始，以"end"结束。最后的"end"是必不可缺的，否则在 if 语句执行完后，就会找不到后续程序的入口。语句中的表达式的值，即真(1)和假(0)指示语句转移的条件。if 语句三种形式的程序结构如图 1-6 所示。

1.5.2.2 while 循环语句

while 语句的格式为

while (表达式)，语句组，end

while 循环语句的流程如图 1-7 所示。语句的执行规则是，当表达式的值为真(1)时，则执行循环体的语句组，并再次计算表达式的值，如果表达式的值还是为真，则继续循环，直到表达式的值为假(0)后，才结束循环，继续向下执行。

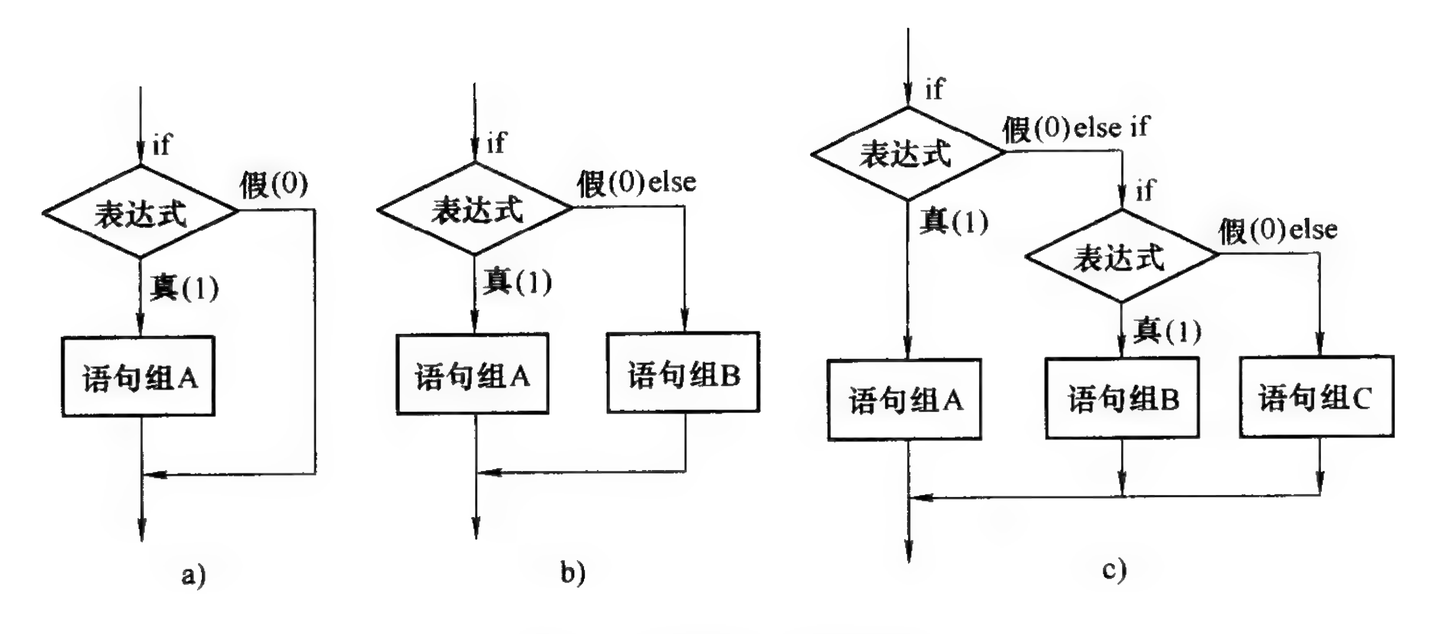


图 1-6　if语句的三种形式

1.5.2.3　for 循环语句

for 语句的格式为

for k = 初始值：增量：终止值，语句组，end

for 语句将循环体中的语句组循环执行 N 次，每执行一次，k 值就增加一个增量，所以循环的次数 N 为

$$N = 1 + (\text{终值} - \text{初值}) / \text{增量}$$

当 k 值等于终止值后，循环结束，程序转向 end 以后的语句。for 语句可以嵌套使用。在循环(语句 while 和 for)执行中，如果满足一定条件需要结束循环，可以使用 break 命令终止循环。

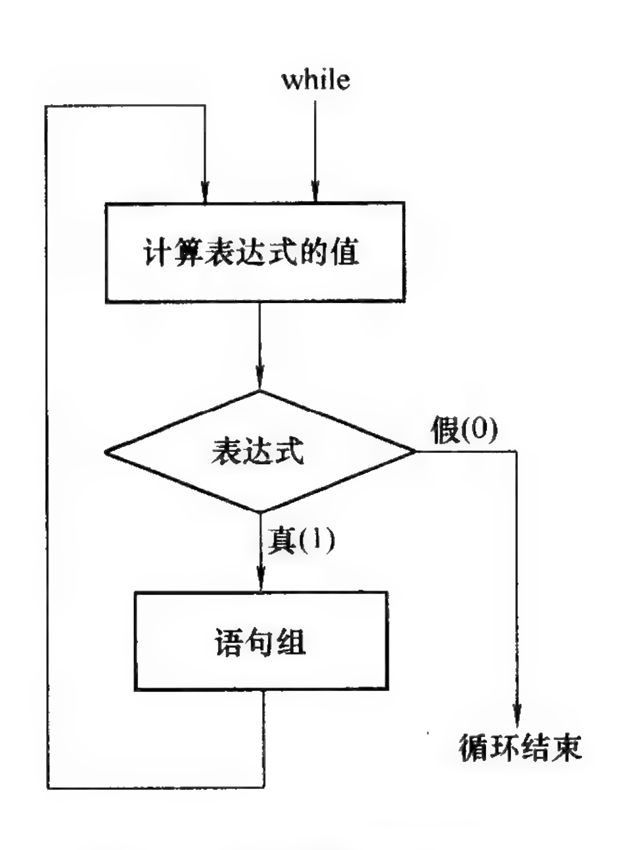


图 1-7　while 语句流程图

1.5.2.4　switch-case 语句

switch-case 语句是一种多分支语句，语句的格式为

switch 表达式(标量或字符串)
case 值 1
语句组 A
case 值 2
语句组 B
……
otherwise
语句组 N
end

在 switch-case 语句中，当表达式的值(或字符串)与某个 case 值(或字符串)相

同时,就执行该 case 值以下的语句组。如果表达式的值(或字符串)与任何一个 case 值都不相同,则执行 otherwise 后的语句组 N。

1.6 MATLAB 常用的其他命令

MATLAB 的命令很多,前面介绍的数学运算和流程控制都是 MATLAB 的命令,下面再介绍一些常用的一般命令,见表 1-7。

表 1-7 MATLAB 的常用命令

命令	简要说明
demo	打开 MATLAB 的示范
help	线上查寻指令
info	显示 MATLAB 的有关信息
lookfor	利用关键词查找相关指令
path	显示路径
type	显示 MATLAB 文件的内容
what	显示 MATLAB 某一目录下的文件
which	显示某一文件的路径
clear	清除变量(内置的常数和变量除外)
clc	清除命令窗口的显示
disp	显示一字符串
length	求出一个矢量的长度
load	装入程序的命令
save	保存程序
who	列出变量名
whos	列出变量的详细情况
cd	改变当前的工作目录
delete	删去一个文件
diary	存储在 MATLAB 环境下的文字
dir	显示目录
unix	用于运行 UNIX 的命令
!	用于运行 DOS 的命令
format	设定输出格式
matlabrc	MATLAB 启动文件
quit	退出 MATLAB

1.7 MATLAB 的绘图功能

MATLAB 计算的结果是数据,这些数据放在工作间(Workspace)中,如果数据量很大,则阅读这些数据是很困难的,习惯是用曲线和图形表示。MATLAB 可以根据给出的数据,用绘图命令画出其图形,通过图形对计算结果进行描述,并且可以对图形进行处理,如加上标题、坐标、网格线和颜色等。本书后面的仿真波形,除小部分示波器画面是用屏幕复制方法截取的以外,主要都是通过 MATLAB 的绘图功能进行绘制的。绘图功能的处理能力,尚有一定限制。因此,图形中的文字符号,与通常规范尚有一些差距。

MATLAB 有很强的绘图功能,可以绘制二维图形、三维图形、直方图和饼图等,这里仅介绍一些常用的基本绘图命令和方法,见表 1-8。

表 1-8 MATLAB 常用的绘图命令

基本 X-Y 图形	plot	线性 X-Y 坐标图
	loglog	双对数坐标图
	semilogx	半对数(X 轴)坐标图
	semilogy	半对数(Y 轴)坐标图
	plotyy	双 Y 轴坐标图
	polar	极坐标图
坐标控制	axis	坐标分度、范围
	hold	保持当前图形
	subplot	拆分子图
图形注释	title	标上图名
	text	图上标注文字
	grid	加上网格线
	gtext	用鼠标定位文字
	xlabl	X 轴文字标注
	ylabl	Y 轴文字标注
	Legend	标注图例

1.7.1 直角坐标中的二维曲线

在 X-Y 直角坐标系上画平面曲线是最常用的绘图方法,MATLAB 绘制平面曲线的基本命令是 plot 命令。在平面上画一条曲线时 plot 命令的用法如下:

1.plot(A)

在 X-Y 平面上画一维数组 A 的图形。命令中 A 是一维数组的变量名。键入

命令,在 X-Y 平面上画出的曲线,其 X 轴表示数组 A 中元素的下标,Y 轴表示数组 A 中对应元素的值。

【例 1-1】 用随机函数画出 20 个随机数的曲线。

```
>> A = rand(1,20)

A =

  Columns 1 through 7
0.9501   0.2311   0.6068   0.4860   0.8913   0.7621   0.4565

Columns 8 through 14

0.0185   0.8214   0.4447   0.6154   0.7919   0.9218   0.7382

Columns 15 through 20

0.1763   0.4057   0.9355   0.9169   0.4103   0.8936

>> plot(A)
```

画得的曲线如图 1-8 所示,rand 函数产生的随机数最大值为 1,最小值为 0,20 个随机数的值之间用折线连接。

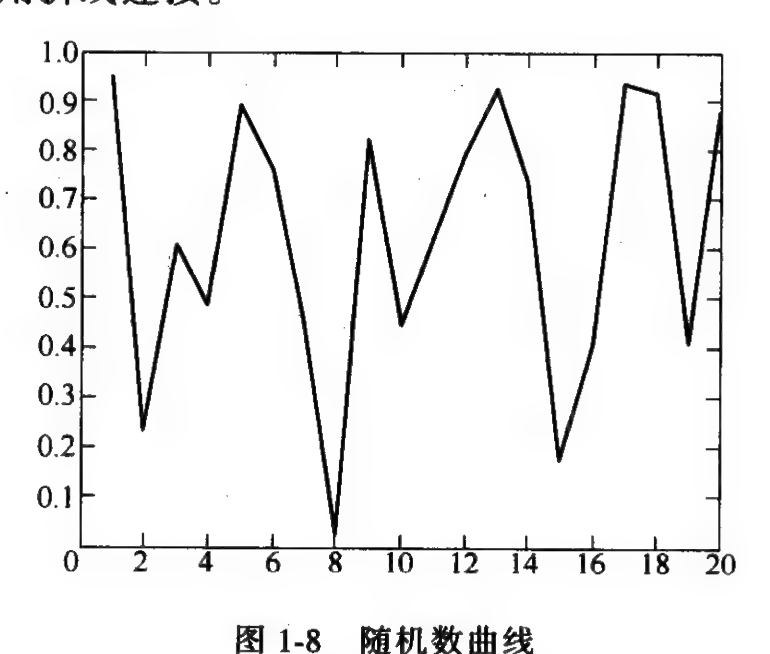


图 1-8 随机数曲线

2. plot(A,B)

画二维数组 A 和 B 组成的曲线。二维数组 A 和 B 组成的曲线是以数组 A 的元素为 X 轴，Y 轴上是对应的数组 B 的元素。A 和 B 之间要用逗号“,”分隔。

【例 1-2】 画一条按正弦衰减的曲线。

```
>> t = 0:0.2:6 * pi;
>> b = exp( - 0.1 * t). * sin(t);
>> plot(t,b)
```

命令执行后得到如图 1-9 所示的曲线，图中 X 轴是时间 t，Y 轴是衰减函数值 b。

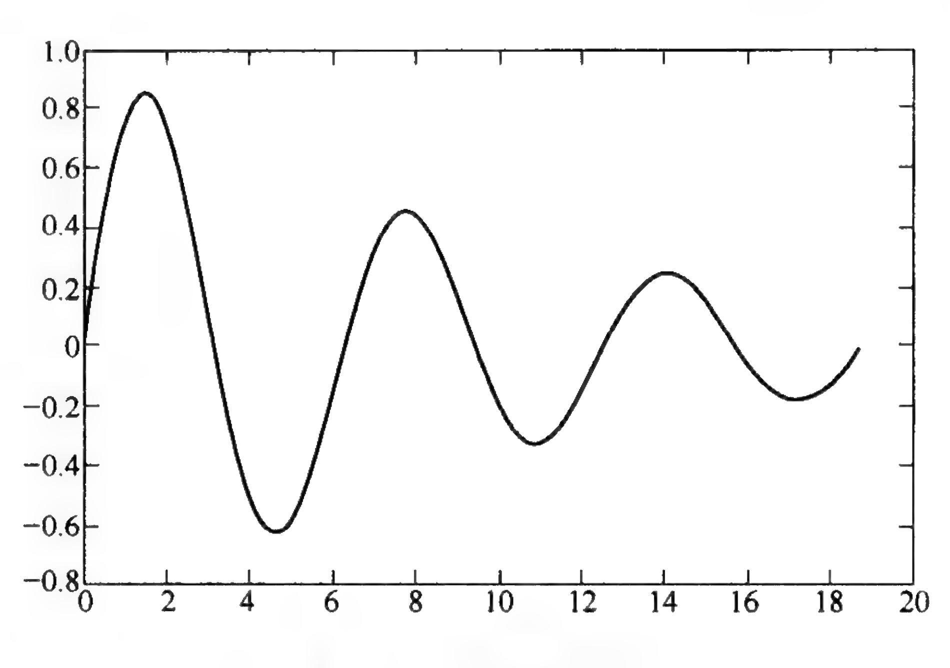


图 1-9 正弦衰减曲线

1.7.2 多条曲线的绘制

如果要在一张图上绘制多条曲线，使用 plot 语句的格式如下：

1. plot(x1,y1,x2,y2,…,xn,yn)

该语句中 x1,y1,x2,y2,…,xn,yn 为 n 组数据，每对数据可以画出一条曲线，一对数据必须有相同的长度，各对数据的长度可以不同。

【例 1-3】 在一张图上画一条幅值为 10 的正弦曲线和一条幅值为 8 的余弦曲线。

命令如下，即

```
t = 0:0.1:4 * pi;
y1 = 10 * sin(t);
y2 = 8 * cos(t);
plot(t,y1,t,y2)
```

plot 命令回车执行后，得到两条正余弦曲线如图 1-10 所示。

2. plot(t,[y1,y2, …,yn])

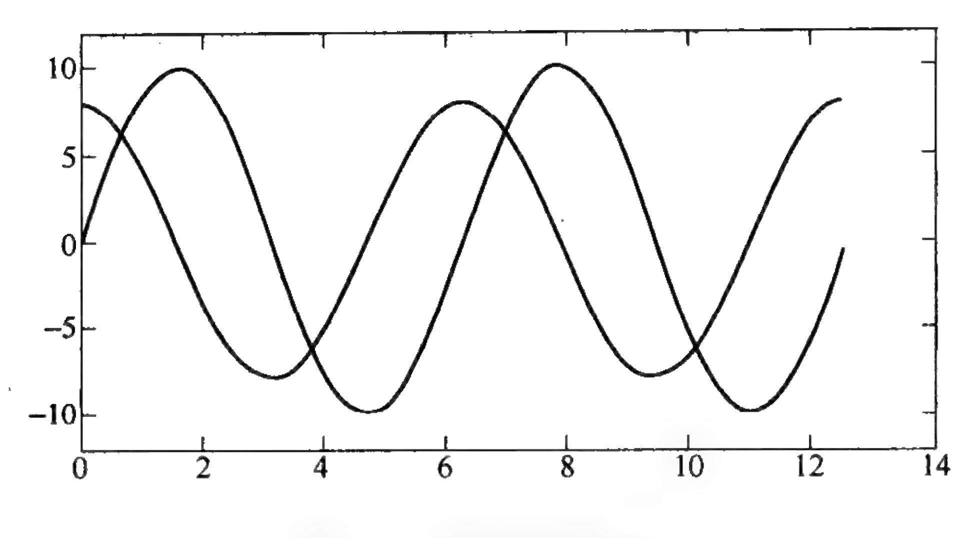


图 1-10　两条曲线的绘制

如果多条曲线有共同的 *X* 轴变量，则多个 *Y* 轴变量可以用方括号括起来。该语句中的“t”是矢量，y = ，[y1，y2，…，yn]是矩阵，若“t”是列（或行）矢量，则“y”的列（或行）长度应与“t”的长度相同，“y”的行（或列）数就是曲线的根数。

3．plot(x1，y1)，hold，plot(x2，y2)

该语句组是将曲线逐条画到一张图上。在画了第一条曲线后，用命令 hold 保持第一条曲线，然后在同一张图上再画上第二条曲线。

4．plotyy

使用这条命令，可以用两种 *Y* 轴比例画图，但是 *X* 轴的比例仍是一个。现仍以例 1-3 进行说明。但在例题中将正弦曲线幅值放大 50 倍，显然这两条曲线画在一张图上是不合适的。这时，可以使用 plotyy 命令，用两个比例来画图。

```
t = 0:0.1:4 * pi;
y1 = 10 * sin(t);
y2 = 8 * cos(t);
y4 = 50 * y1;
plotyy(t,y4,t,y2)
```

图 1-11　以不同的 *Y* 轴比例尺画曲线

画得的波形如图 1-11 所示，图中正弦曲线的 *Y* 轴比例尺在左边，余弦曲线的比例尺在右边。

1.7.3 曲线的线型和颜色

多条曲线绘图时，MATLAB 会自动地以不同颜色标出曲线，以便区分。如果对曲线的颜色和线型另有要求，可以在绘图命令中指出，命令的格式为

plot(x1,y1,'<线型标识符><颜色标识符>',x2,y2,'<线型标识符><颜色标识符>'…)

线型标识符和颜色标识符见表 1-9。

表 1-9 线型标识符和颜色

颜色标识符	颜色	线型标识符	线型
y	黄	.	点
m	品红	o	小圆圈
c	青	×	叉号
r	红	+	加号
g	绿	-	实线
b	蓝	*	星号
w	白	:	虚线
k	黑	-.	点划线
		--	长划线

1.7.4 MATLAB 的图形窗口

在 MATLAB 6.1 版中，图形都画在图形窗口中，键入命令"figure"，则可弹出图形窗口。实际上运行命令 plot 后，图形窗口就已经自动打开了，不过图形窗口有时在屏幕的下层，这时看屏幕下方的提示栏，有一个 Figure1 No.1 文件，点击该文件，图形窗口就移到上层，图形窗口的画面如图 1-12a 所示。

图形窗口上方是标题、主菜单和快捷键工具栏。菜单中的文件打开、保存、复制、粘贴、打印等功能与其他 Windows 菜单功能相类似，这里介绍一些绘图中常用的特殊功能。

1.7.4.1 设置图形画面参数

用 MATLAB 绘图命令 plot 画出的是简单的曲线和波形，为了使图形画面更说明问题，画面更美观，往往需要在画面上添加一些内容，如标题、物理量、单位、网格线和文字等。在主菜单 Edit 下提供了两个选项，可以使图形进入编辑状态。这两个选项是：

(1)"Figure Properties …"为图面参数设置。

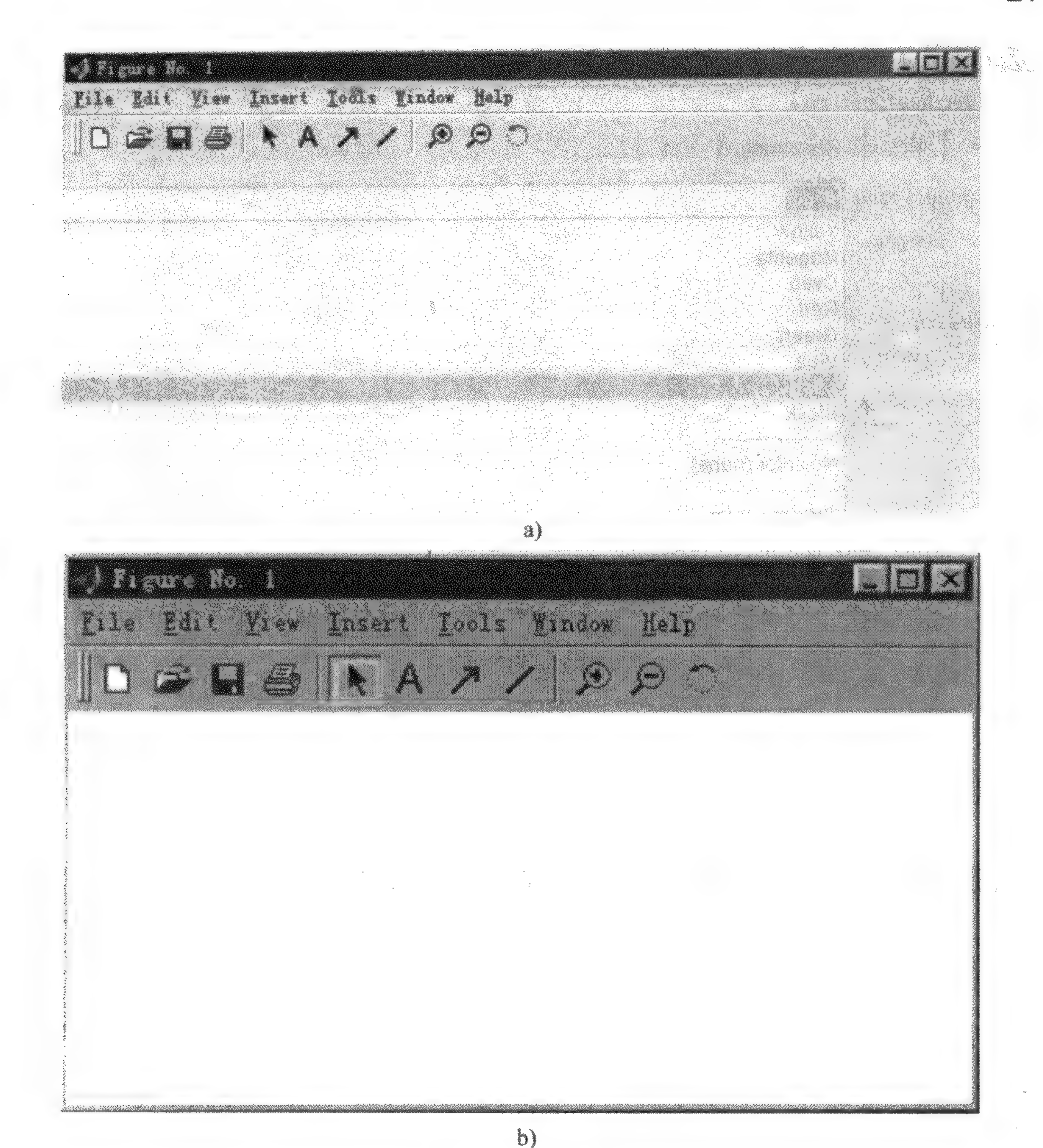


图 1-12　图形窗口

（2）“Axes Properties …”为坐标参数设置。

1. 改变图面背景颜色

图形窗口图形区的原始背景是暗淡的灰色（见图 1-12a），可以用“Figure Properties …”选项改变背景颜色。在点击“Figure Properties …”后，弹出图 1-13 所示的对话框。对话框里有四页，第一页“style”下有背景颜色一栏（Background color），在该栏下拉菜单中有各种颜色可以选择（见图 1-13）。对黑白文档一般可以选择白色（White），反白后的图形窗口如图 1-12b 所示。

2. 设置标题和坐标轴物理量等

点击“Axes Properties …”选项、弹出（见图 1-14）对话框。对话框内有 7 页，其

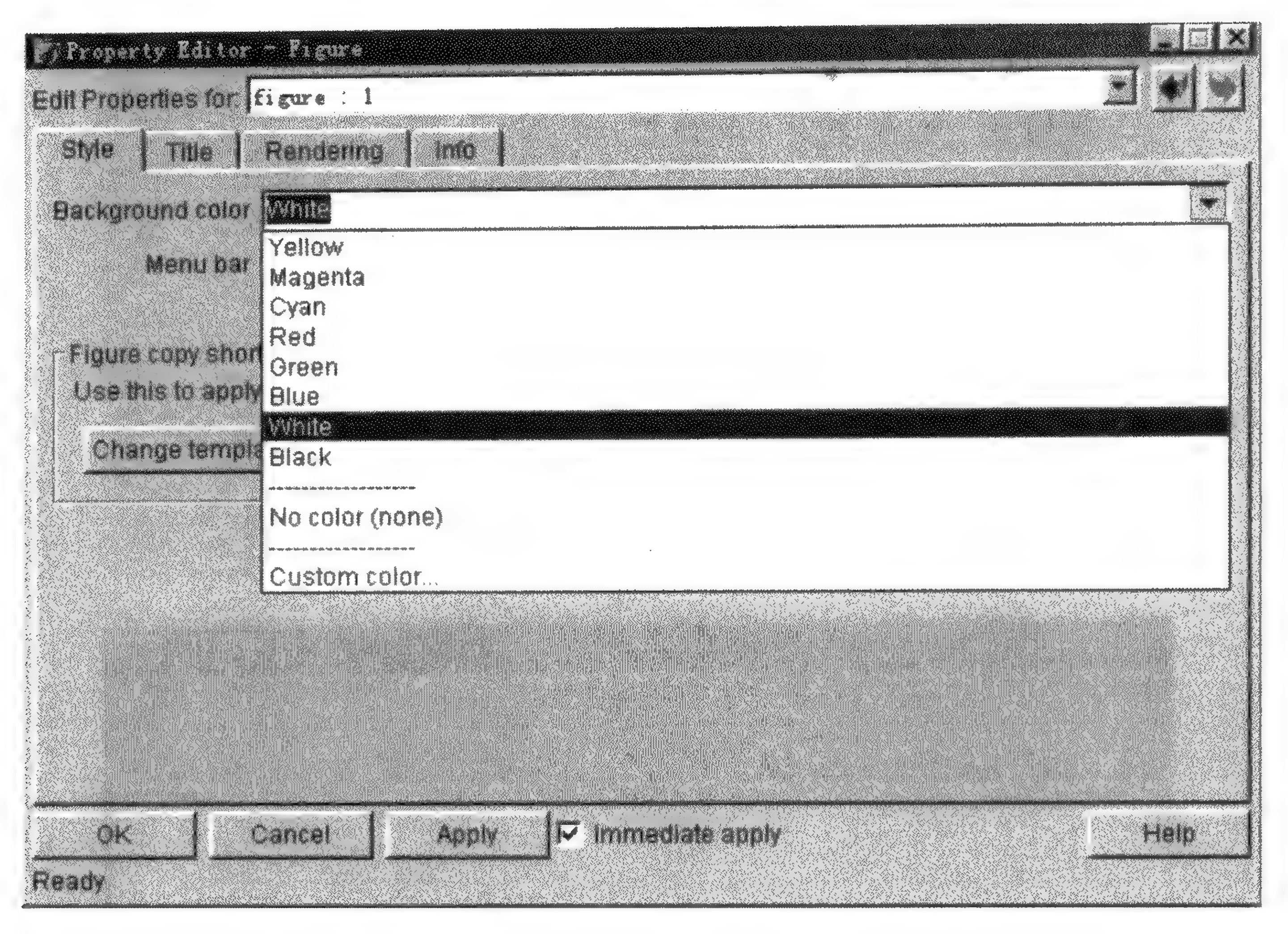


图 1-13　图面参数对话框

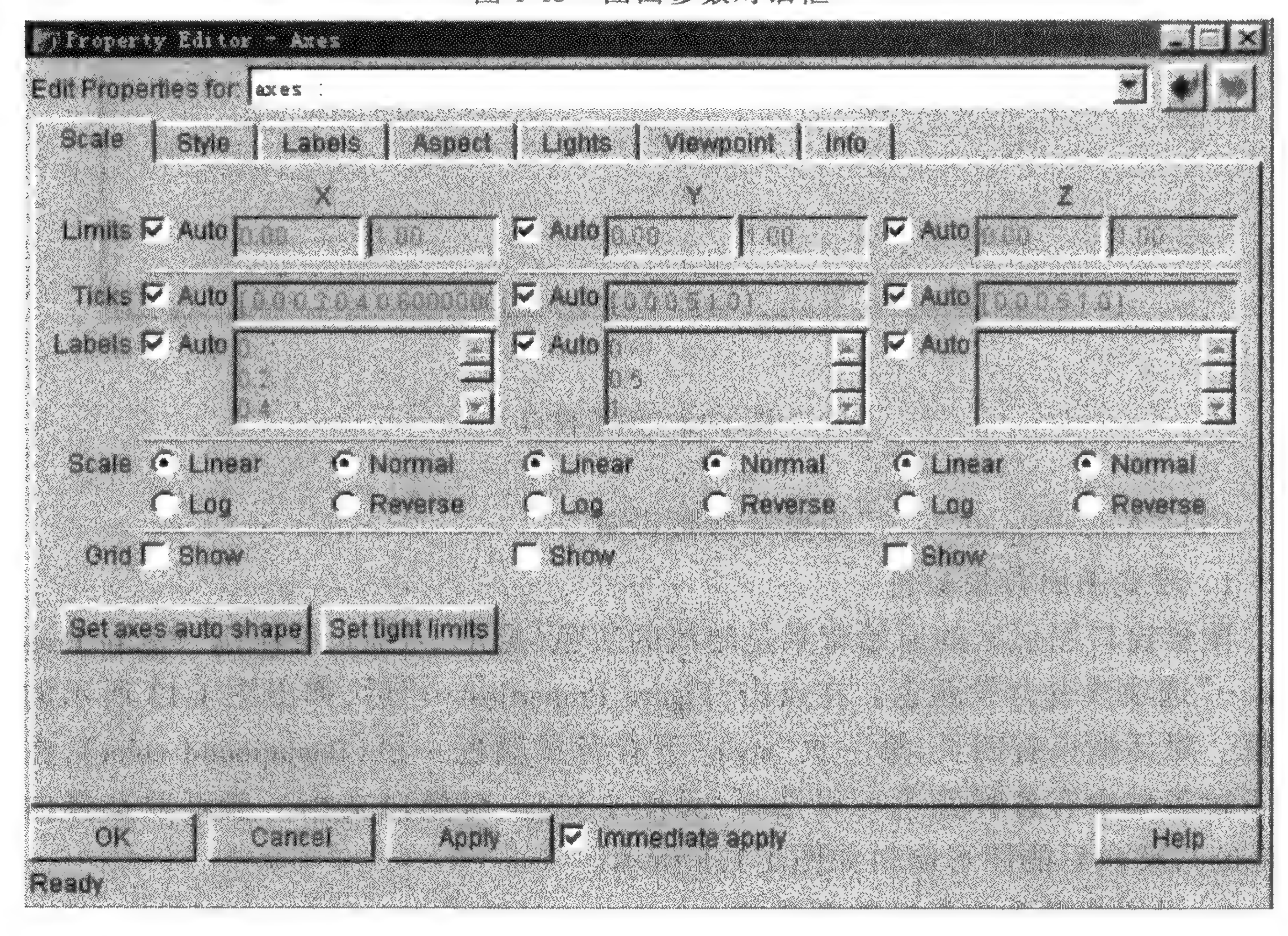


图 1-14　坐标参数对话框

中常用的是“Scale”和“Labels”两页。

在坐标参数页(Scale)中(见图 1-14),可以设置 X、Y、Z 三个轴的参数有坐标的范围(Limits)、坐标的分度(Ticks)、选择需要标示的分度值(Labels)、坐标类型选择(Scale)和网格线(Grid)等。这些项系统默认的是“自动(Auto)”方式,即软件会根据输入的图形,自动选定坐标范围,适当的分度和标注。如果要另行设定,只需要点击该项后面的小方框,将小方框中的“√”号去掉,其后的参数框变亮,这时就可以进行新的参数设置。

坐标的类型有线性(Linear)和对数(Log),标准(Normal)和反置(Reverse)可选。网格线可以选择显示或者隐藏。

“Axes Properties …”选项的标签页(Labels)如图 1-15 所示。在该页中可以给图形标注图形名称,X 轴向和 Y 轴向物理量名称和单位等。

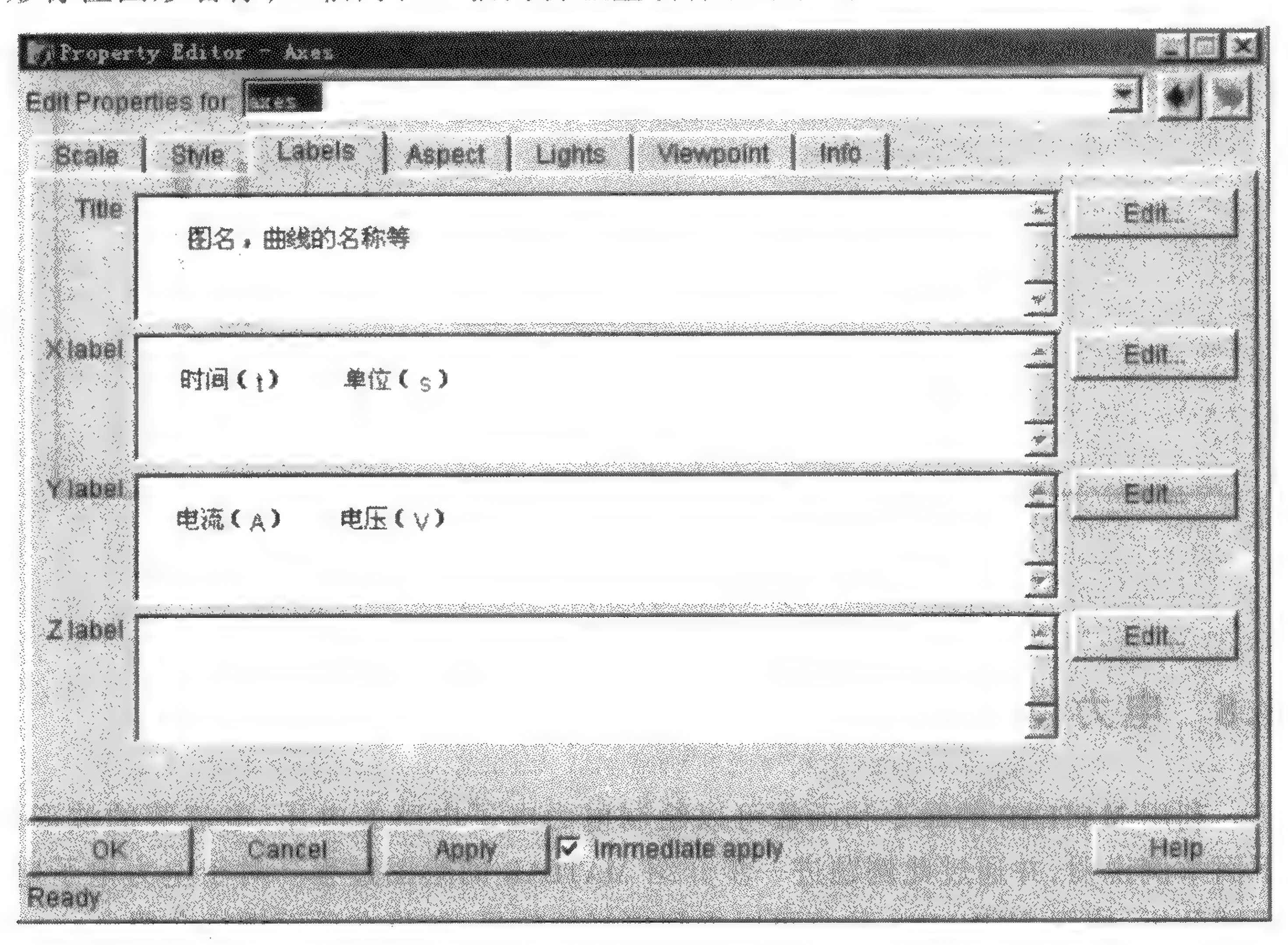


图 1-15　图形标签页

1.7.4.2　在图形上添加箭头、线段和文字

如果需要在图形画面上添加箭头、线段和文字,只需要使用图形窗口的工具栏,使用这些工具可以画面上插入箭头、直线和文字。这些工具的含义见表 1-10。选定工具后,拖拉光标就可以在图形上添加箭头和线段,并且可以键入文字。如

果对箭头、线段和文字的位置不满意，可以用光标将该箭头、线段和文字点击选中，拖拉移动到恰当位置，如果拖拉箭头、线段两端的小黑块，可以调整箭头线段的长度和方向。

表 1-10　图形窗口工具栏

图形							
含义	图形编辑	插入文字	插入箭头	插入线段	图形放大	图形缩小	旋转(3D 图形)

在选中箭头和线段后，点击鼠标右键，则弹出选项框，在选项框中可以选择箭头和线段的线型和磅值。可以选择的线型和磅值如图 1-16 所示。

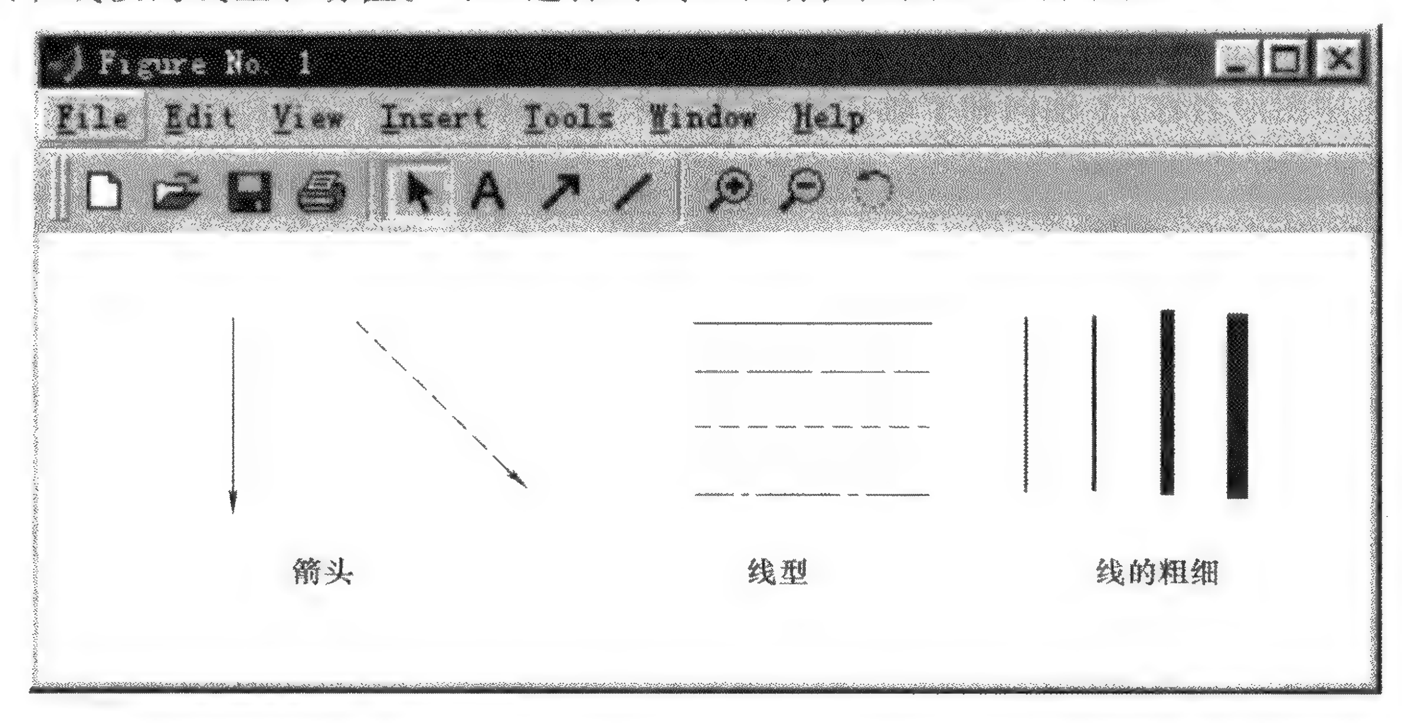


图 1-16　箭头和线型

1.8　电力电子电路波形图的绘制

利用 MATLAB 的命令和函数可以绘制电力电子电路的电压、电流等的波形，下面举例说明，并通过此例题进一步介绍 MATLAB 的绘图过程。对于电力电子电路的分析，使用 SIMULINK 仿真可以得到更好的效果，这将在后面进行介绍。

【例 1-4】　单相半波不控整流电路(见图 1-17)，已知交流电源电压 220V，负载电阻为 2Ω。画出交流电源电压、整流输出电压和电流的波形。

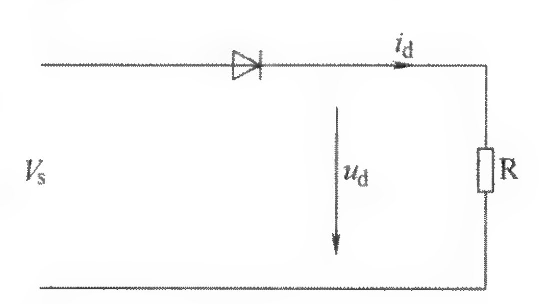


图 1-17　单相半波不控整流电路

MATLAB 命令窗口键入命令如下(命令前的行号是为说明而另加的)：

```
1    >> V = 220 ;                % 交流电压有效值
```

```
2    >> R = 2;                          % 电阻值
3    >> dth = pi/360;                   % 导通角增量
4    >> th = 0:dth:2 * pi;              % 一周期中导通角
5    >> vs = V * sqrt(2) * sin(th);     % 交流电压
6    >> ud = vs. * (vs > = 0);          % 整流输出电压
7    >> id = ud/R;                      % 整流输出电流
8    >> plot(th,vs), hold               % 画交流电压波形
   Current plot held
9    >> plot(th,ud,th,id)               % 画整流电压电流波形
```

命令中,1~7行为赋值命令,第8行命令画交流电压电压的波形,回车执行命令,则画出交流电压电压的波形如图1-18a所示。在该行中使用了“hold”命令,目的是在画下面波形时,交流电压的波形还会保留,不会被清除掉。执行第9行命令后,电源电压、输出电压和输出电流三条曲线就出现在同一幅图上(见图1-18b)。在图形窗口这三条曲线是以不同颜色来区分的,但是如果将这图形复制到黑白文档上时,有的颜色线条就显示不出来,图中的处理方法是将这三条曲线都置成黑色(见图1-18c),然后用文字和不同的线型来区分这三条曲线。标注符号或文字可以用工具栏上的 A 键,改变线型和颜色,可以将光标指向曲线,点击右键,

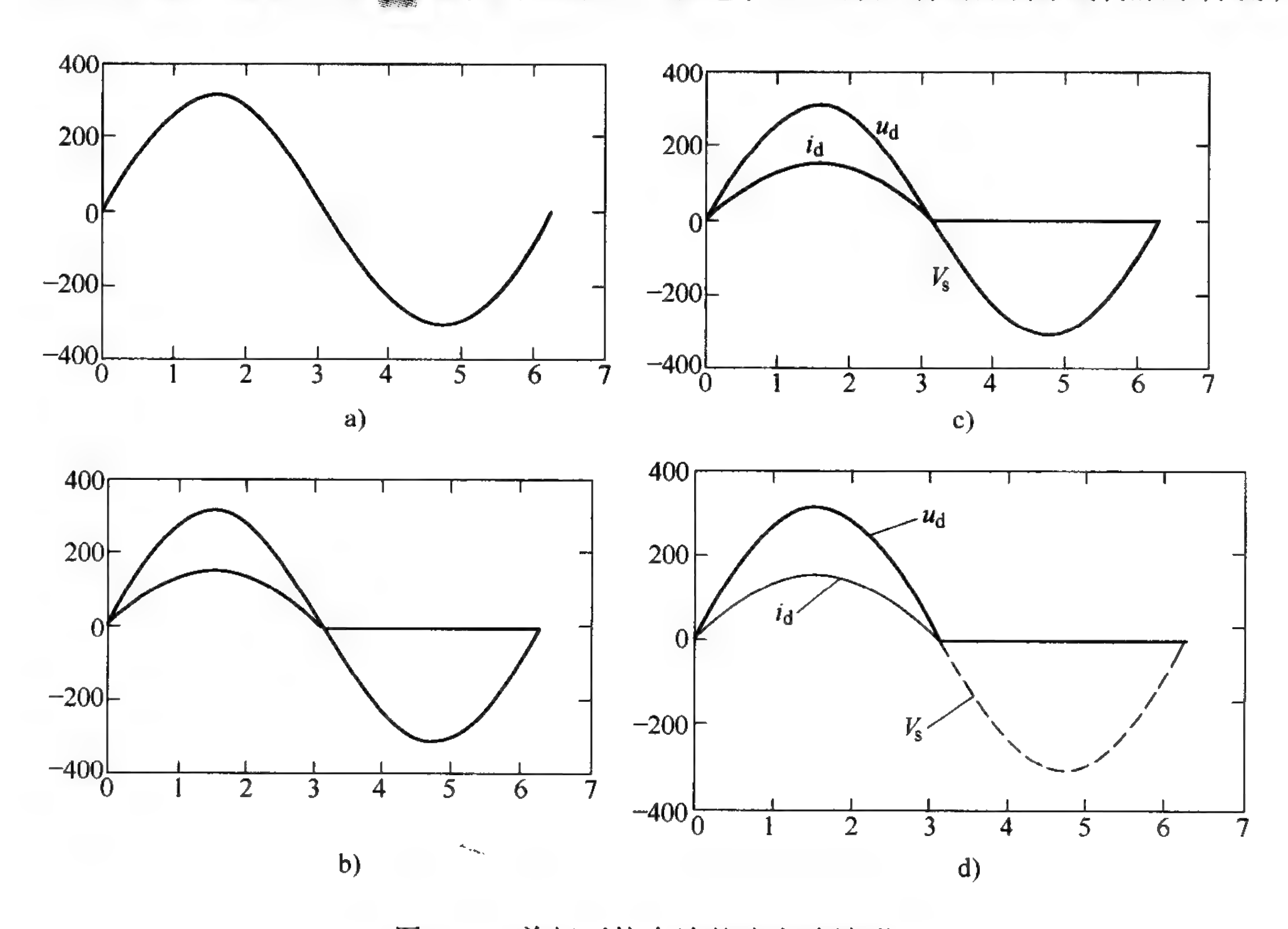


图 1-18　单相不控半波整流电路波形

在弹出的对话框中选择。加上文字和改变线型后的图如图 1-18d 所示。

图 1-18 所示的波形图还可以进一步美化,使其具有更好的可读性。使用图形窗口 Edit 菜单下的“Axes Properties …”选项,设置 *X-Y* 坐标轴和名称。在图 1-19 所示的页面上,对 *X* 轴参数作了修改,并选择了网格线。在图 1-20 所示的页面上,键入了图名和坐标参数名称和单位。经过以上步骤后,波形图的效果如图 1-21 所示。

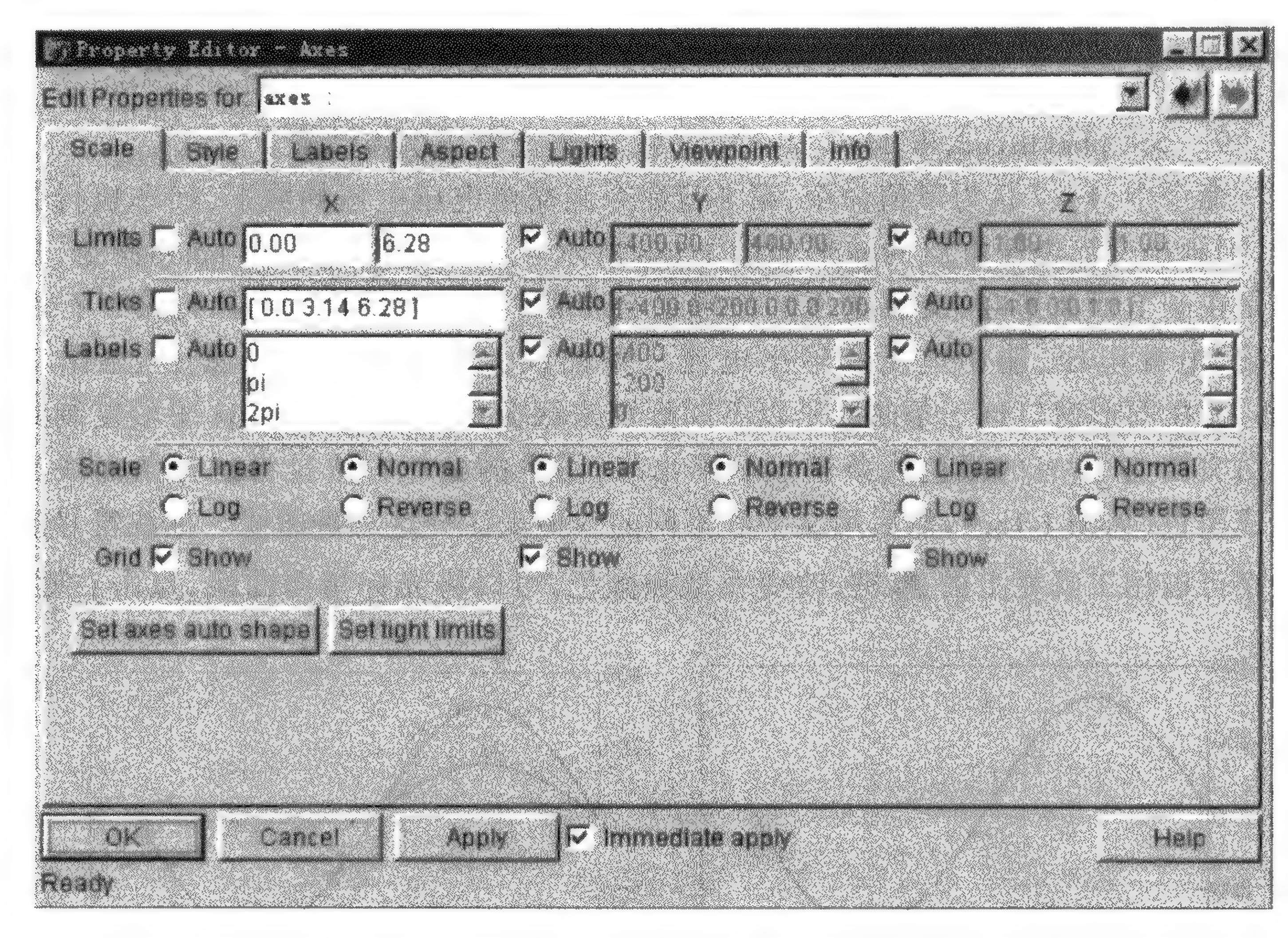


图 1-19　坐标轴设置一

【例 1-5】　单相桥式全控整流电路如图 1-22 所示,交流电源电压 120V,阻感负载。画出控制角为 $\pi/6$ 时,整流电路负载侧的电压波形。

```
>> VS = 120;
>> Ud = 0.9 * VS * cos(alpha);
>> th = 0:delta:2 * pi + alpha;
>> vs = 120 * sqrt(2) * sin(th);
>> th1 = pi/6:delta:pi + pi/6;ud1 = 120 * sqrt(2) * sin(th1);
>> ud1 = 120 * sqrt(2) * sin(th1);
>> th2 = pi + pi/6:delta:2 * pi + pi/6;
>> ud2 = 120 * sqrt(2) * sin(th2);
```

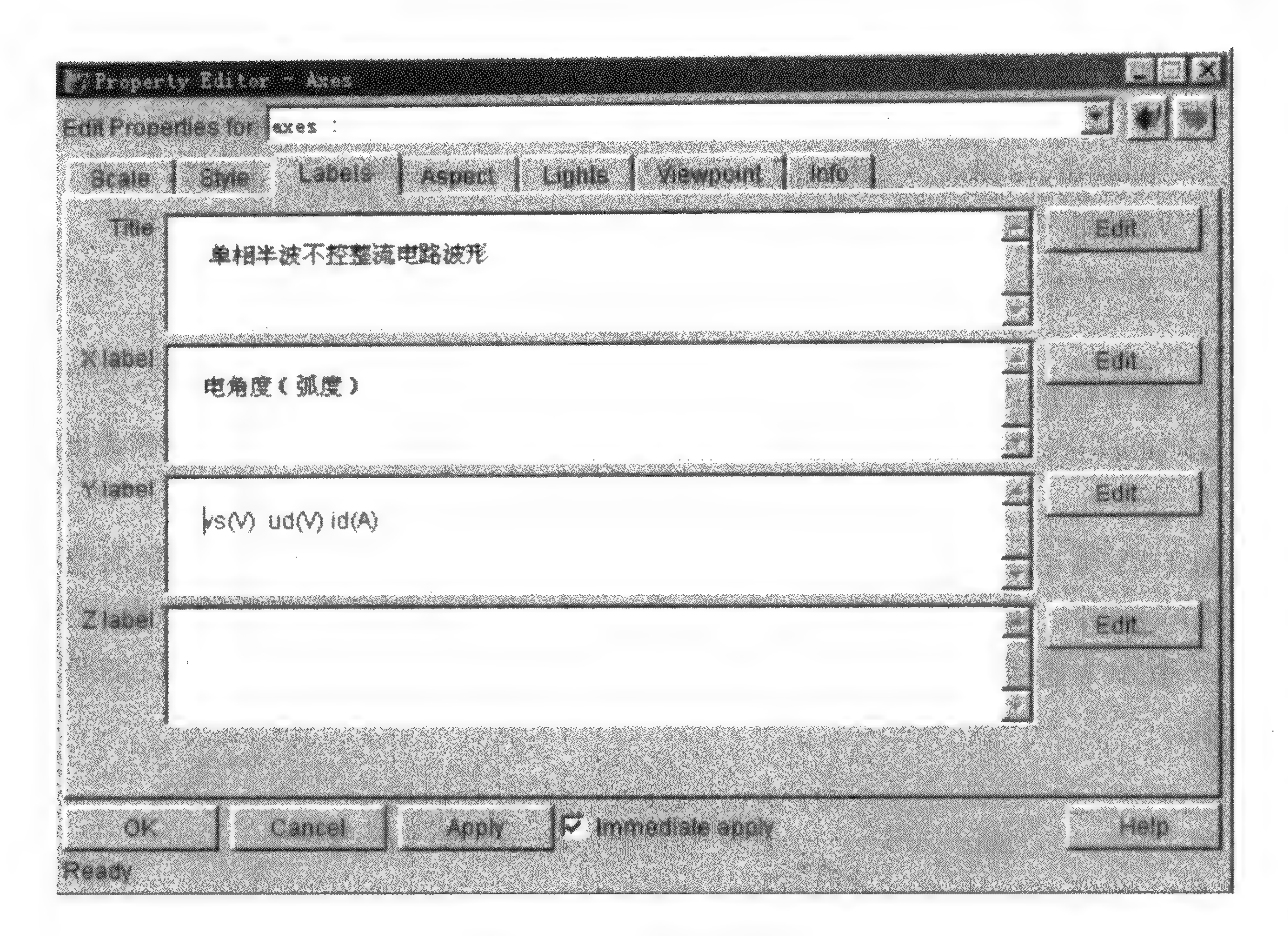


图 1-20　坐标轴设置二

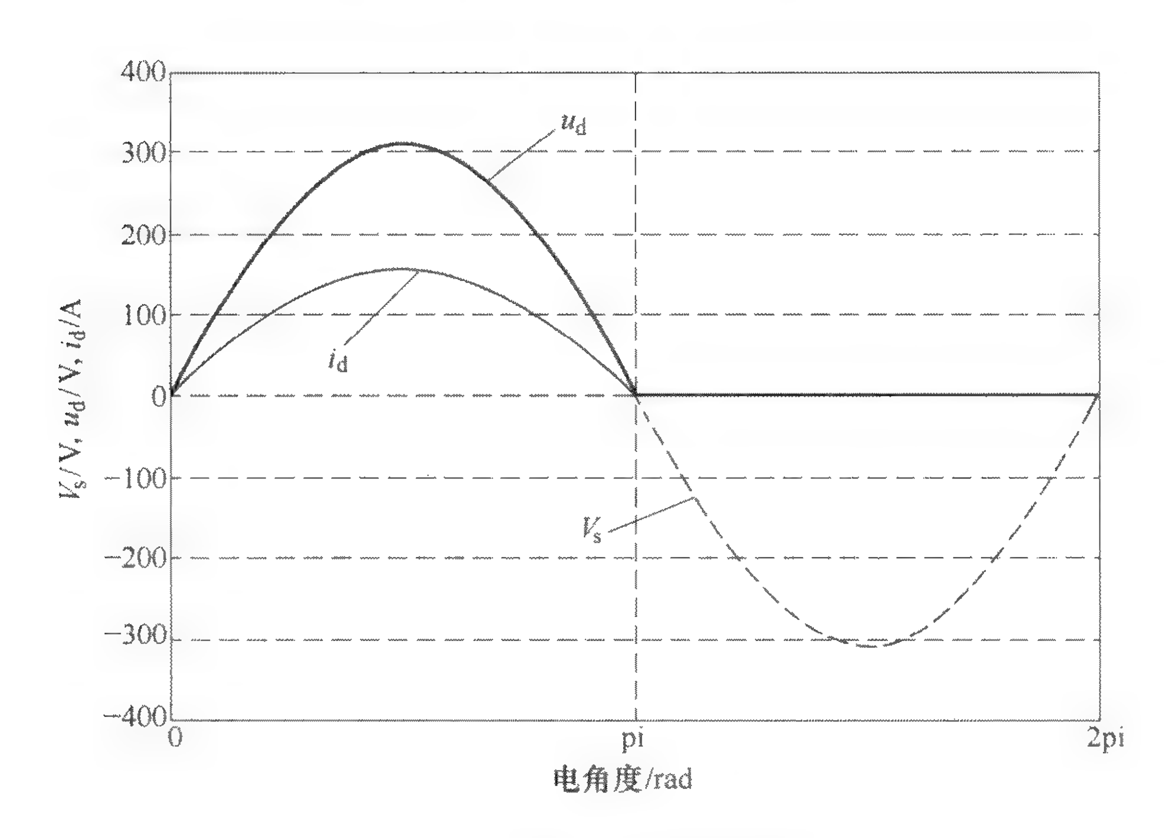


图 1-21　修改后的图形画面

```
>>  th3 = 0:delta:pi/6;
>>  ud3 = 120 * sqrt(2) * sin(th3);
```

```
>> plot(th,vs,th1,ud1)
% VT1 和 VT3 导通区间
>> plot(th,vs,th3,-ud3,th2,-ud2)
% VT2 和 VT4 导通区间
>> plot(th,vs,th3,-ud3,th1,ud1,th2,-ud2)
```



```
% 整流器输出电压
>> plot(th,VS,th3,-ud3,th1,ud1,th2,-ud2)
```

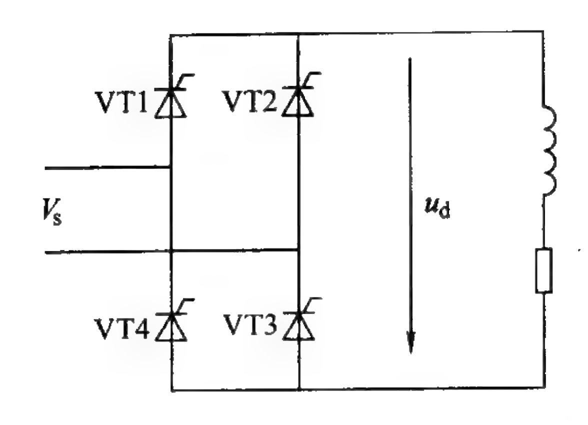


图 1-22　单相桥式全控整流电路

图 1-23 所示为晶闸管 VT1、VT3 导通区间的整流器输出电压波形，交流电源电压以点线标出。图 1-24 所示为晶闸管 VT2、VT4 导通区间的整流器输出电压波形，图 1-25 所示为整流器一个周期输出电压波形，图 1-26 所示为加上图注后的整流电压波形。

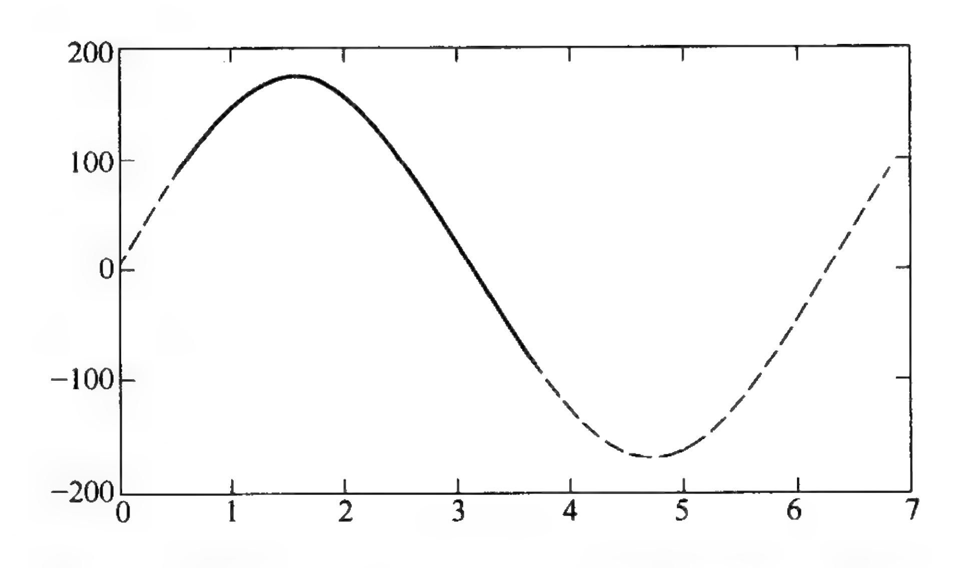


图 1-23　晶闸管 VT1、VT3 导通区间的整流器输出电压波形

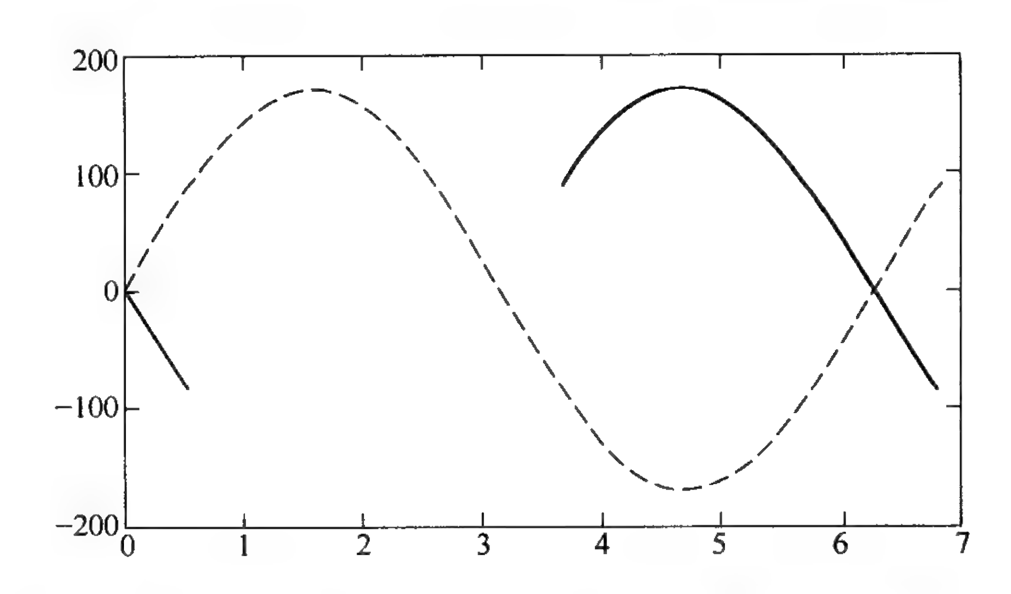


图 1-24　晶闸管 VT2、VT4 导通区间的整流器输出电压波形

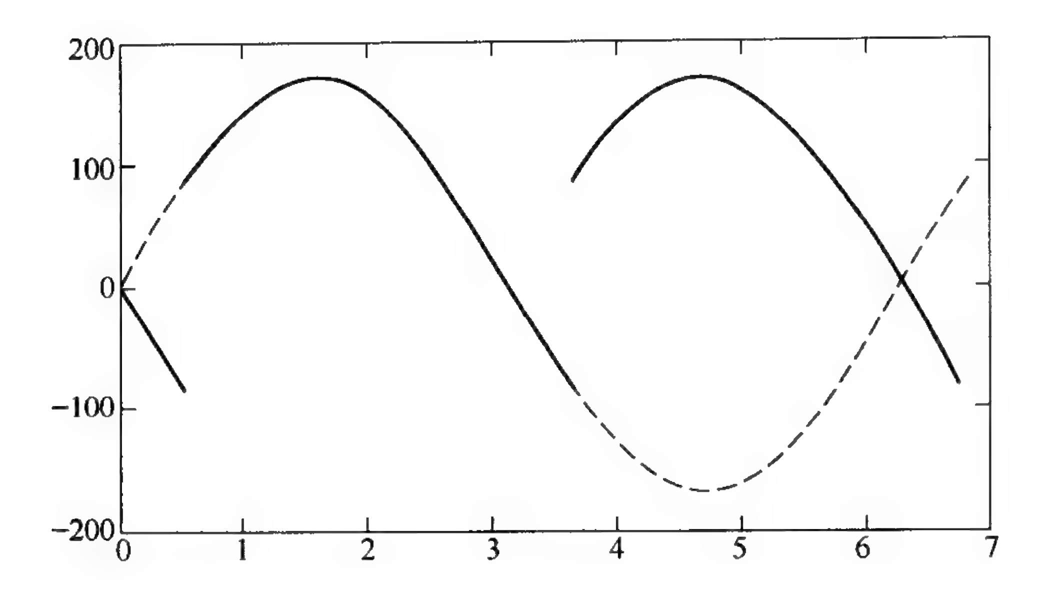


图 1-25 整流器一个周期整流电压波形

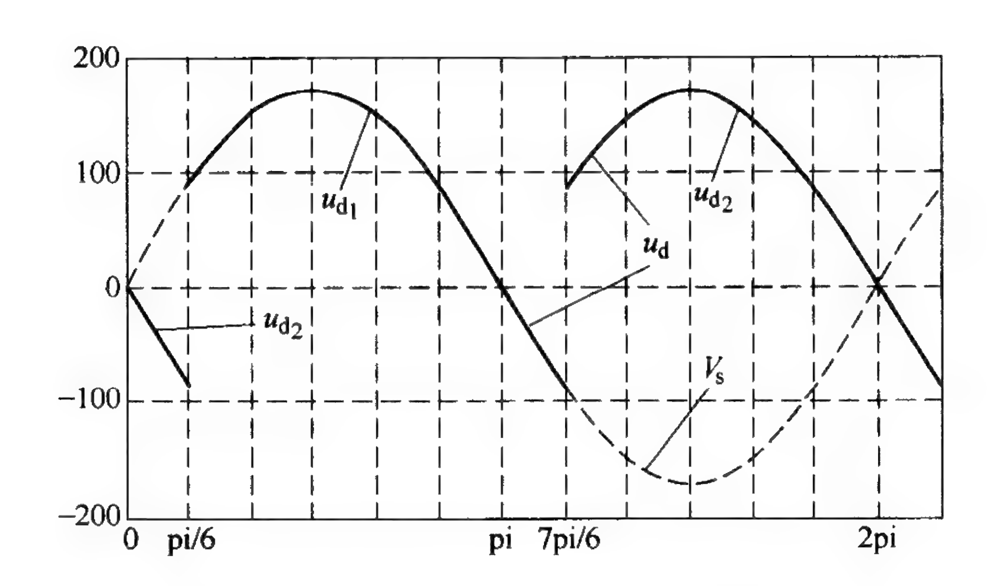


图 1-26 加上图注后的整流电压波形

第2章　SIMULINK 环境和模型库

MATLAB 的 SIMULINK 是很有特色的仿真环境，在此环境中，用户可以用点击拖动鼠标的方式绘制和组织系统或电路，并完成对系统和电路的仿真。原来的 MATLAB 仿真编程是在文本窗口中进行的，编制的程序是一行行的命令和 MATLAB 函数，不直观也难以与实际的物理系统或电路建立形象的联系。在 SIMULINK 环境中，系统的函数和电路元器件的模型都用框图来表达，框图之间的连线则表示了信号流动的方向。对用户来说，只要学习图形界面的使用方法和熟悉模型库的内容，就可以很方便地使用鼠标和键盘进行系统和电路的仿真，而不必去记那些复杂的函数，这无疑是受欢迎的。MATLAB 的工具箱已经有极其丰富的内涵，现在结合本书的内容，主要介绍 SIMULINK 工作环境和系统仿真（SIMULINK）和电力系统（Power System Block）两个模型库。

2.1　系统仿真（SIMULINK）环境

系统仿真（SIMULINK）环境也称工具箱（Toolbox），是 MATLAB 最早开发的，它包括 SIMULINK 仿真平台和系统仿真模型库两部分，主要用于仿真以数学函数和传递函数表达的系统，是 20 世纪 70 年代开发的连续系统仿真程序包（CCS）的继续，现在的系统仿真（SIMULINK）包括了连续系统、非线性系统和离散系统的仿真。由于 SIMULINK 的仿真平台使用方便、功能强大，后来拓展的其他模型库也都共同使用这个仿真环境，成为 MATLAB 仿真的公共平台。SIMULINK 是 Simulation 和 Link 两个英文单词的缩写，意思是仿真链接，MATLAB 模型库都在此环境中使用，从模型库中提取模型放到 SIMULINK 的仿真平台上进行仿真。所以，有关 SIMULINK 的操作是仿真应用的基础。

SIMULINK 作为面向系统框图的仿真平台，它具有如下特点：

（1）以调用模块代替程序的编写，以模块连成的框图表示系统，点击模块即可以输入模块参数。以框图表示的系统应包括输入（激励源）、输出（观测仪器）和组成系统本身的模块。

（2）画完系统框图，设置好仿真参数，即可启动仿真。这时，会自动完成仿真系统的初始化过程，将系统框图转换为仿真的数学方程，建立仿真的数据结构，并计算系统在给定激励下的响应。

（3）系统运行的状态和结果可以通过波形和曲线观察，这和实验室中用示波

器观察的效果几乎一致。

(4) 系统仿真的数据可以用以 .mat 为后缀的文件保存，并且可以用其他数据处理软件进行处理。

(5) 如果系统框图绘制不完整或仿真过程中出现计算不收敛的情况，会给出一定的出错提示信息，但是这提示不一定准确，这是软件还不够完备的地方。

(6) 以框图形式对控制系统进行仿真是 SIMULINK 的最早功能，后来在 SIMULINK 的基础上又开发了数字信号处理、通信系统、电力系统、模糊控制等数 10 种模型库，但是 SIMULINK 的窗口界面是其他工具箱共用的平台，在此平台上可以进行控制系统、电力系统、通信系统等各种系统的仿真。

2.1.1 SIMULINK 的工作环境

2.1.1.1 SIMULINK 环境的进入

从 MATLAB 窗口进入 SIMULINK 环境有以下几种方法（见图 2-1）：

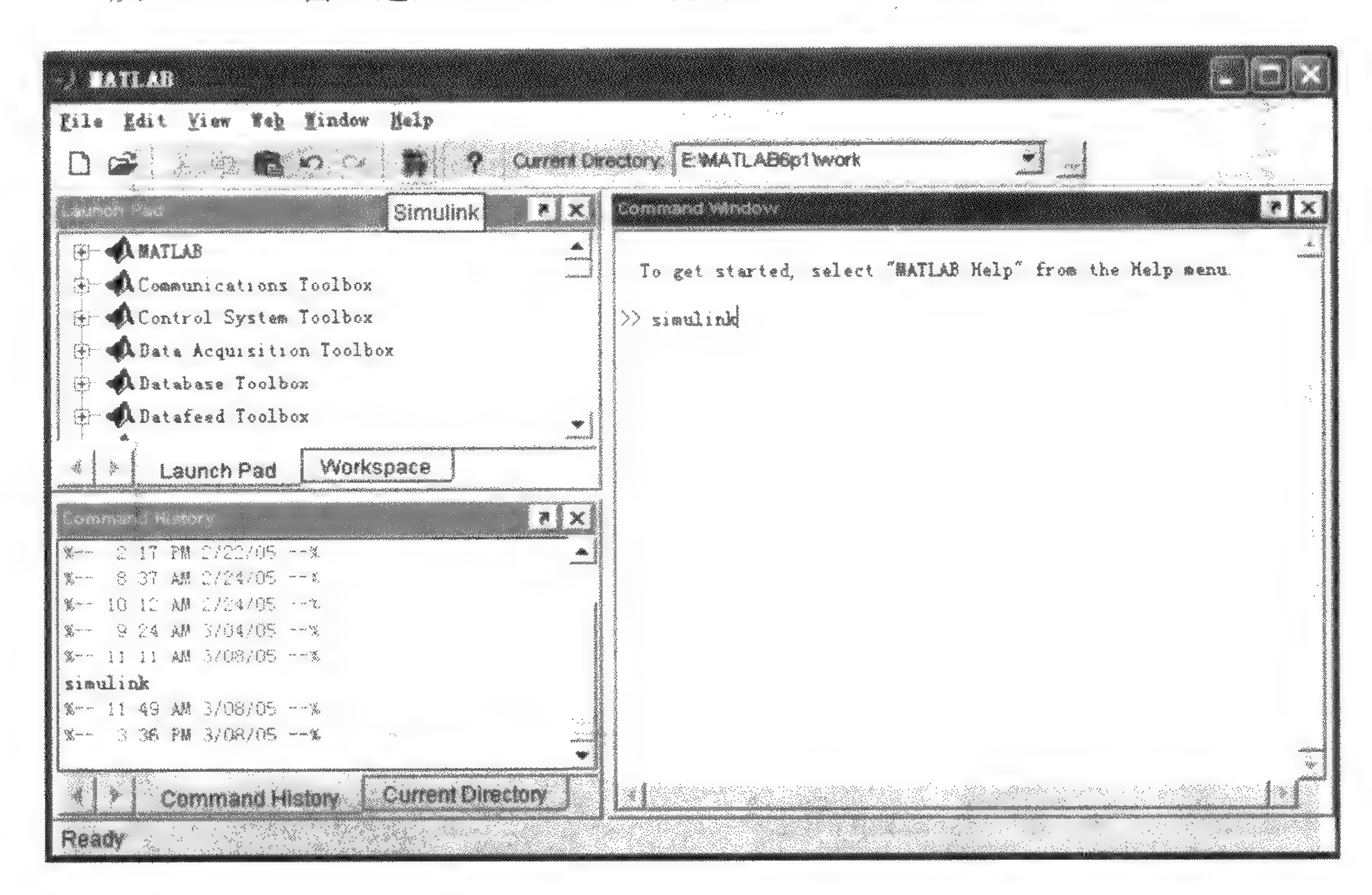


图 2-1 从 MATLAB 窗口进入 SIMULINK 环境

(1) 在 MATLAB 的菜单栏上选择 File，在下拉菜单中的 New 选项下选中 Model。

(2) 在 MATLAB 的工具栏上点击按钮，然后在打开的模型库浏览窗口菜单上点击按钮。

(3) 在 MATLAB 的文本窗口中键入“simulink”后回车，然后在打开的模型库浏览窗口的菜单上点击按钮。

完成上述操作之一后，屏幕上出现 SIMULINK 的工作窗口（见图 2-2）。在 SIMULINK 工作窗口上方标题栏上，“untitled”表示一个尚未命名的新文件，在其上方右侧是最小化、最大化和关闭三个按钮。标题栏下方是菜单栏，这里有 File（文件）、Edit（编辑）、View（查看）、Simulation（仿真）、Format（格式）、Tools（工具）和 Help（帮助）7 项主要功能菜单。第三栏是菜单命令的等效按钮。窗口下方有仿真状态的提示栏，在启动仿真后，在该栏中可以提示仿真的进度和使用的仿真算法。窗口中部的空白部分是绘制仿真模型框图的空间，这是对系统仿真的主要工作平台。

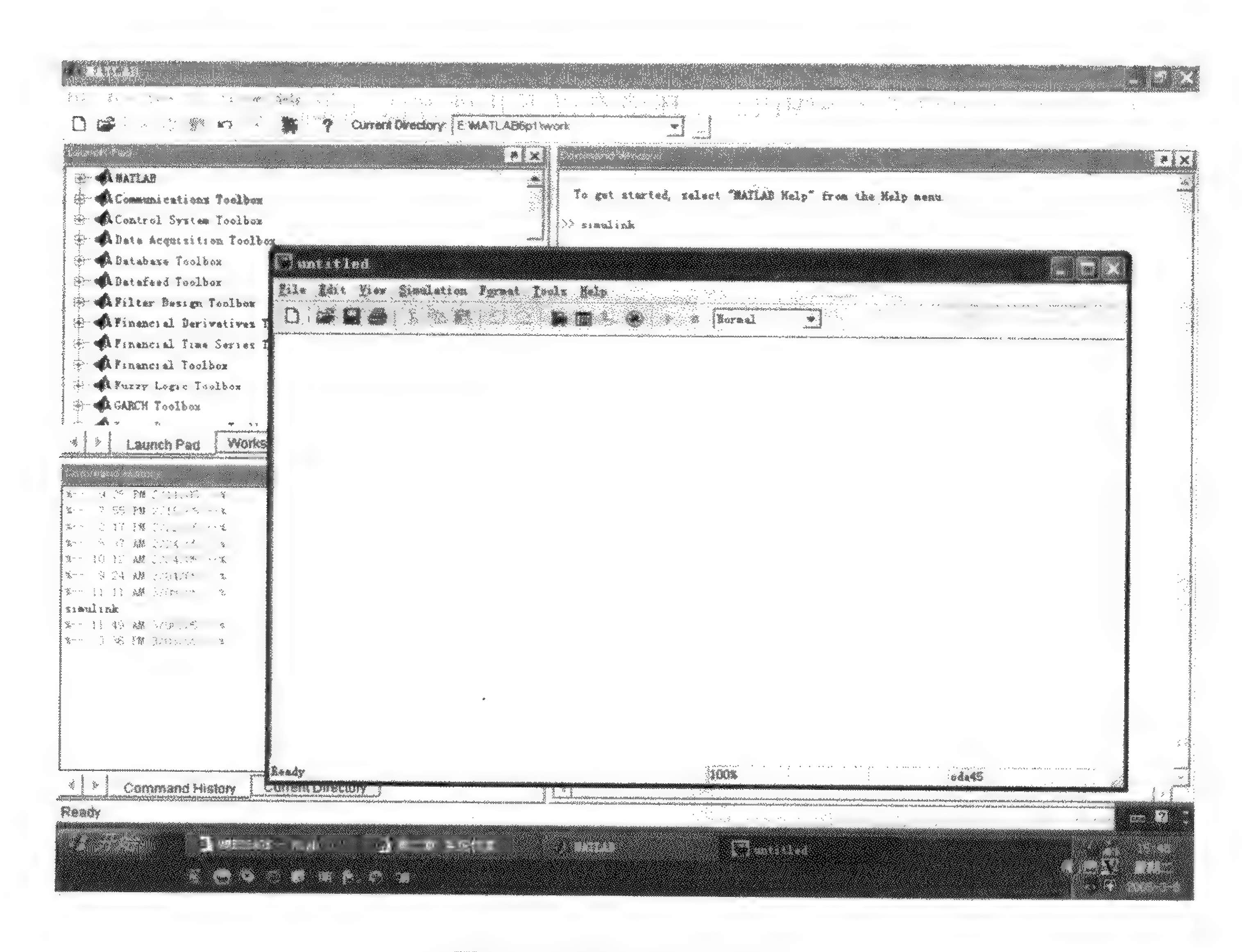


图 2-2　SIMULINK 工作窗口

2.1.1.2　SIMULINK 窗口菜单命令

1. File 文件菜单

File 文件菜单见表 2-1。

2. Edit 编辑菜单

Edit 编辑菜单见表 2-2。

表 2-1　File 文件菜单

选　　项	快 捷 键	选项含义
New	Ctrl + N	创建新的 SIMULINK 工作窗口
Open	Ctrl + O	打开已经存在的 SIMULINK 模型文件
Close	Ctrl + W	关闭当前的 SIMULINK 工作窗口
Save	Ctrl + S	保存当前的仿真模型文件，文件的路径和文件名保持不变
Source control		登记编辑文件的文件名及路径等到源系统中
Model properties		模型属性
Preference		选项
Save as		将当前的仿真模型文件按新的路径、文件名保存
Print	Ctrl + P	打印模型文件
Print Setup		打印设置
Exit MATLAB	Ctrl + Q	退出 MATLAB

表 2-2　Edit 编辑菜单

选　　项	快 捷 键	选项含义
Undo Add	Ctrl + Z	撤消前一次操作
Redo	Ctrl + Y	恢复前一次操作
Cut	Ctrl + X	剪切选定的内容，并放到剪贴板上
Copy	Ctrl + C	复制选定的内容，并放到剪贴板上
Past	Ctrl + V	将剪贴板上的内容，粘贴到光标所在位置
Clear	Delete	清除选定的内容
Select all	Ctrl + A	全部选定整个窗口的内容
Copy model to clipboard		将窗口的模型复制到剪贴板上
Find	Ctrl + F	寻找目标的位置
Block parameters		显示选定模块的参数
Block properties		显示选定模块的属性
Greate subsystem	Ctrl + G	创建分支模块，将选定的部分系统模型打包，以一个模块表示
Mask subsystem	Ctrl + M	封装分支模块
Look under mask	Ctrl + U	显示分支模块的内容
Link options		链接选择
Update diagram	Ctrl + D	更新模型框图的外观

3. View 查看菜单

View 查看菜单见表 2-3。

表 2-3 View 查看菜单

选 项	选项含义
Toolbar	显示或隐藏工具栏
Statebar	显示或隐藏状态栏
Model browser	显示模型浏览器
Block data tips	显示模型内部数据
Show library browser	显示模型库
Zoom out	放大模型显示比例
Zoom in	缩小模型显示比例
Fit system to view	自动选择合适的显示比例
Normal	标准的显示比例（100%）

4．Simulation 仿真功能菜单

Simulation 仿真功能菜单见表 2-4。

表 2-4 Simulation 仿真功能菜单

选 项	快捷键	选项含义
Start（Pause）	Ctrl + T	启动（或暂停）仿真
Stop		停止仿真
Parameters	Ctrl + E	仿真参数设置
Normal		用标准模式仿真
Accelerator		仿真加速器
External		外部模式仿真

5．Format 模块格式菜单

Format 模块格式菜单见表 2-5。

表 2-5 Format 模块格式菜单

选 项	快捷键	选项含义
Font		字体设置
Text alignment		标题定位
Flip name		移动模块名
Hide（show）name		隐藏（或显示）模块名
Flip block	Ctrl + I	水平反转模块
Rotate block	Ctrl + R	模块旋转 90°
Show（Hide）drop shadow		显示（隐藏）模块的阴影
Show（Hide）port labels		显示（隐藏）子系统标签
Foreground color		设置前景颜色
Background color		设置背景颜色
Screen color		设置屏幕颜色
Sample time color		为不同采样时间序列添加颜色

（续）

选　项	快捷键	选项含义
Wide nonscalar lines		以宽线表示非标量信号
Signal dimensions		标出信号维数
Port data types		标上端口的数据类型
Storage class		存储类型
Execution order		执行次序

6. Tools 工具菜单

Tools 工具菜单见表 2-6。

表 2-6　Tools 工具菜单

选　项	选项含义
Data explorer	数据输出选择
SIMULINK debugger	SIMULINK 调试程序
Data class designer	数据类型设计
Model differences	模型比较
Profiler	优化 M 文件的工具
Coverage settings	模型设置
Real-time workshop	实时工作间选择
External mode control panel	外部模式控制板
Fixed-point	定点运算
Linear analysis	线性分析设置
Report generator	模型文件设置清单
Requirements management interface	外部模式控制设置

2.1.2　模型库浏览器

模型库是 SIMULINK 的重要内容，模型库中保存了控制系统中常用的典型环节的模型，在系统仿真时，只要调用这些典型环节就可以很方便地组成系统的仿真模型。SIMULINK 工具箱的模型都可以通过模型库浏览器（SIMULINK Library Browser）来查找。在模型库浏览器上有 20 余种模型库，包括电力系统模型库、通信系统模型库、数字信号模型库、定点处理模型库等。本节主要介绍模型库的打开，模型库的内容和有关模块的一些常用操作。

为了叙述方便，本书将模型库中以图标形式表示的典型环节模型称为模块，将用典型环节模块组成的系统仿真模型简称为模型。

2.1.2.1　SIMULINK 模型库的打开

打开 SIMULINK 模型库的方法有如下几种：

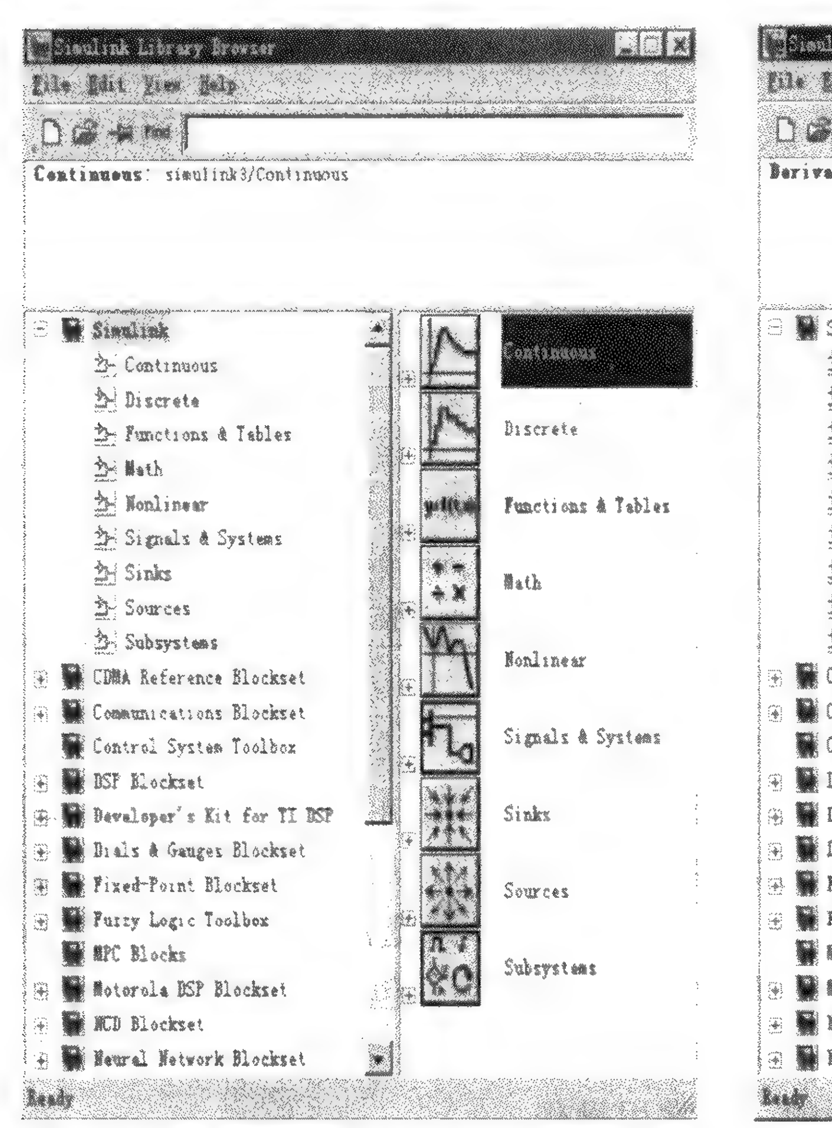
(1) 在 MATLAB 窗口的工具栏上点击按钮。

(2) 在 MATLAB 的文本窗口中键入“simulink”。

(3) 在 SIMULINK 窗口上点击按钮 。

完成上述操作之一，即可弹出模型库浏览器（Simulink）窗口（见图 2-3）。窗口左部的树状目录是各分类模型库的名称。在分类模型库下还有二级子模型库，点击模型库名前带“+”的小方块则可展开二级子模型库的目录，点击模型库名前带“-”的小方块则可关闭二级目录。

模型库浏览器窗口的右部是用图标表示的二级子目录，图标前带“+”的小方块表明该图标下还有三级目录，在这里点击或直接点击图标则可以在窗口中展现三级目录下的模型图标。图 2-4 所示为打开 SIMULINK 的连续系统（Continuous）子模型库后的窗口。在窗口右边展现了 Continuous 子模型库中的 8 个典型环节的模块。



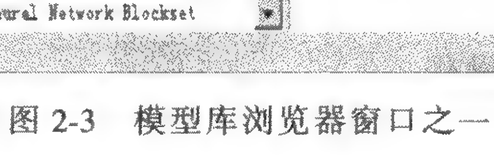


图 2-3　模型库浏览器窗口之一

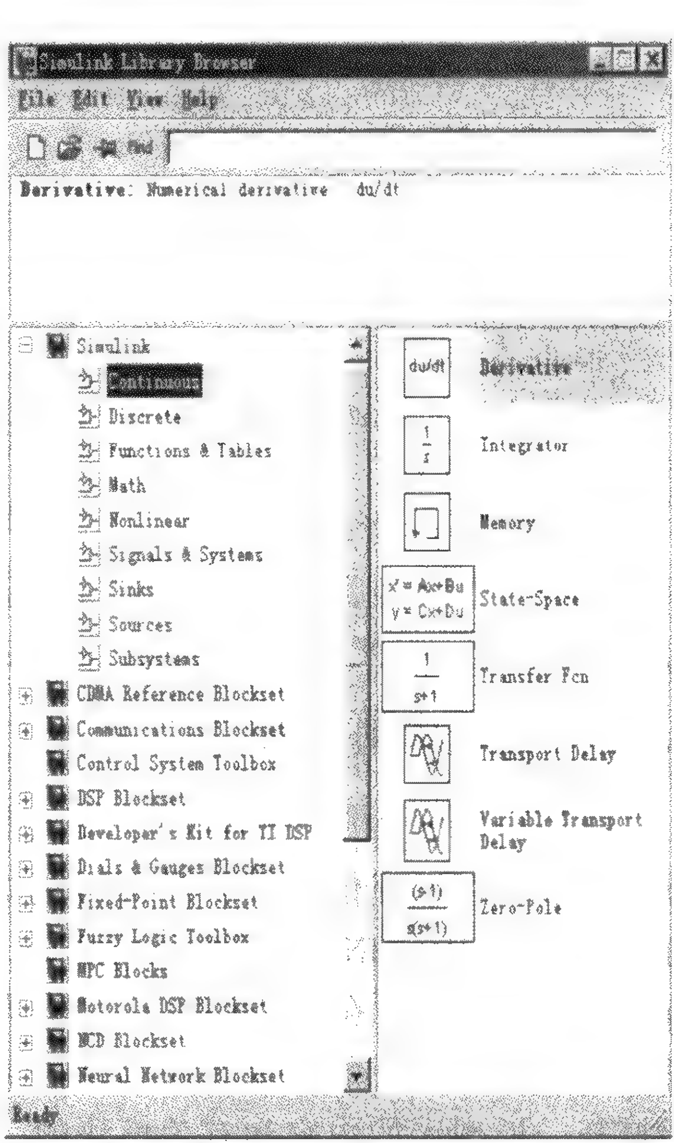


图 2-4　模型库浏览器窗口之二

利用窗口中的滚动条可以搜索 SIMULINK 的所有模型库，随着 SIMULINK 版本的更新，模型库内容在不断地增加，SIMULINK 模型库在软件安装时可以选择。

2.1.2.2　有关模块的基本操作

有关模型库模块的操作很多，这些操作都可以用菜单功能和鼠标来完成，

这里仅介绍一些主要的、常用的操作。

1. 模块的提取

用 SIMULINK 对系统进行仿真，首先第一步就是将需要的模块从模型库中提取出来，并放到 SIMULINK 的仿真平台上去（SIMULINK 窗口的中间空白区）。方法有以下两种。

(1) 在模型浏览器窗口选中需要的模块（鼠标点击），选中的模块名会反色，然后在 Edit 菜单栏下选择“Add to current model”，这时选中的模型会出现在 SIMULINK 的仿真平台上。

(2) 将光标指针移动到需要的模块上，按住鼠标左键将模型图标拖曳到 SIMULINK 的平台上，然后松开鼠标即可，这是常用的快捷方法。

2. 模块的复制和粘贴

已经放到 SIMULINK 平台上的模块，如果系统中需要用到几个，则可以复制；如果要将平台上的模块或模型转移到另一个系统的仿真中使用，也可以采用复制的方法，其操作步骤如下：

(1) 将光标指针移动到需要的模块上，点击鼠标左键，模块的四角出现 4 个小黑块（■），表明该模块已被选中，然后在 Edit 菜单下选择复制命令（Copy），再用粘贴命令（Paste）就可以将它复制到其他地方。

采用这种方法不仅可以复制一个模块，并且可以同时复制几个不同的模块，或者复制仿真模型的一部分乃至全部，然后转移到其他地方使用。如是后者只需要按下鼠标左键拖拉鼠标，平台上即出现一个虚线的方框，松开鼠标，曾被虚线方框包围的所有模块四角都会出现小黑块（■），即表示已被选中，然后使用复制和粘贴命令就可以复制或转移到其他地方使用。

(2) 在同一模型中需要复制某一模块，可以用更简捷的办法，就是在选中模块的同时按下 Ctrl 键拖拉鼠标，选中的模块上会出现一个小“+”号，继续按住鼠标和 Ctrl 键不动，移动鼠标就可以将该模块拖拉到模型的其他地方复制出一个相同的模块，同时该模块名后会自动加“1”，因为在同一仿真模型中，不允许出现两个名字相同的模块。

3. 模块的移动、放大和缩小

为了使绘制的系统比较美观，需要将各个调用的模块放到合适的位置上，也需要调整模块的大小比例，可以进行如下操作：

(1) 移动模块仅需要将光标指针移到该模块上，点住鼠标左键，拖曳该模块到相应位置即可。也可以在选中模块后用键盘上的上、下、左、右键移动模块。

(2) 放大或缩小模块只需要在选中该模块后，将光标移到模块四角的小黑块（■）上，这时光标变成双向小箭头，按下鼠标左键按箭头方向拖动，则可调节模块图标外形的大小。

4. 模块的转动

为了模块与模块之间的连线方便，有时需要转动模块的方向。转动模块的方向只需要在选中模块后，使用 Format 菜单下的 Flip block 和 Rotate block 两条命令，Flip block 命令使模块水平反转，Rotate block 命令使模块作 90°旋转。

5. 模块名的修改和移动

在每个模块的下方都有一个模块名，模块名可以修改、移动和隐藏。修改模块名，首先用鼠标点击该模块名，点击后模块名的外侧出现小框，“ | ”光标在框内闪烁，这时可以和文本文件一样，修改模块名称，模块名称可以是英文或中文。

模块名的放置位置可以调整，但只能是在模块的上方或下方，这仅需在点中模块名时不松开鼠标，直接将模块名拖动到模块的上下方即可。如果不需要显示模块名，则首先选中模块，然后在 Format 菜单下点击 Hide name 命令即可，这时模块名被隐藏起来。如果需要重新显示模块名，同样选中模块后，在 Format 菜单下选择 Show name 命令，隐藏的模块名会重新显示出来。

6. 模块的参数设置

SIMULINK 模型库里的模块放到仿真窗口之后，在使用前大多数模块都需要设置模块的参数。模块参数的设置很简单，只要将光标箭头移到模块图标上，双击鼠标左键，这时就会弹出参数对话窗口，如图 2-5 所示。图 2-5 中在仿真平

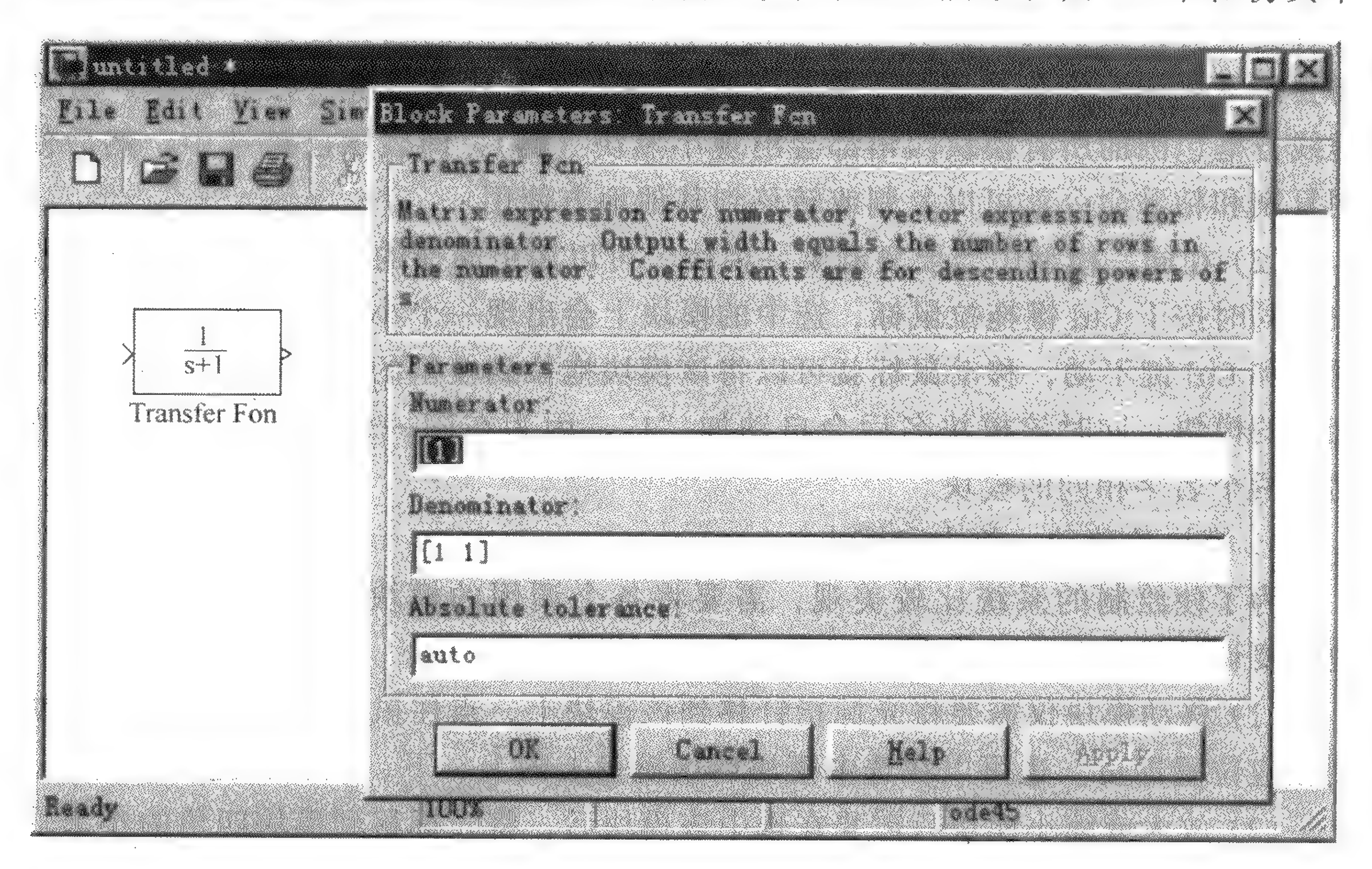


图 2-5 模块的参数设置

台上有一个传递函数的模块，双击该模块就弹出了模块的对话框，框中上部是模块功能的简要介绍，下面是模块参数设置栏，在设置栏中可以按要求键入参数。如果对参数设置有不清楚的地方，可以使用对话框下方的 Help 按钮取得帮助，这时会打开该模块的说明书。参数设好后，点击 OK 按钮关闭对话框，模块参数就设置完毕。一般模块的参数设置都在系统的仿真模型画好后一起进行，模块的参数在仿真的进行过程中是不能修改的。

7. 模块的删除和恢复

对放在平台上的模块，如果不再需要则可以将其删除，操作步骤是选中要删除的模块后，使用键盘的 Delete 键来删除。在模型浏览器中的模块是只读的不能被删除。如果要删除已经构建了模型的某一部分或全部，可以在要删除的部分上点鼠标左键拖拉出一个方框，框内的全部模块和连线将被选中，然后按 Delete 键，这部分模型包括连线就被删除。

被删除的模块和内容可以用 Edit 菜单下的 Undo 命令或按钮恢复。

以上操作也可以使用鼠标右键，即在选中模块后点击鼠标右键，然后在打开的菜单中选择相应的选项。

8. 模块的连接

使用 SIMULINK 仿真，系统模型是由多个模块组成的，模块与模块间需要用信号线连接，连接的方法是，将光标箭头指向模块的输出端，对准后光标变成“十”字星，这时按下鼠标左键拖曳“十”字星到另一个模块的输入端后松开鼠标左键，在两个模块的输出和输入端之间就出现了带箭头的连线，并且箭头表

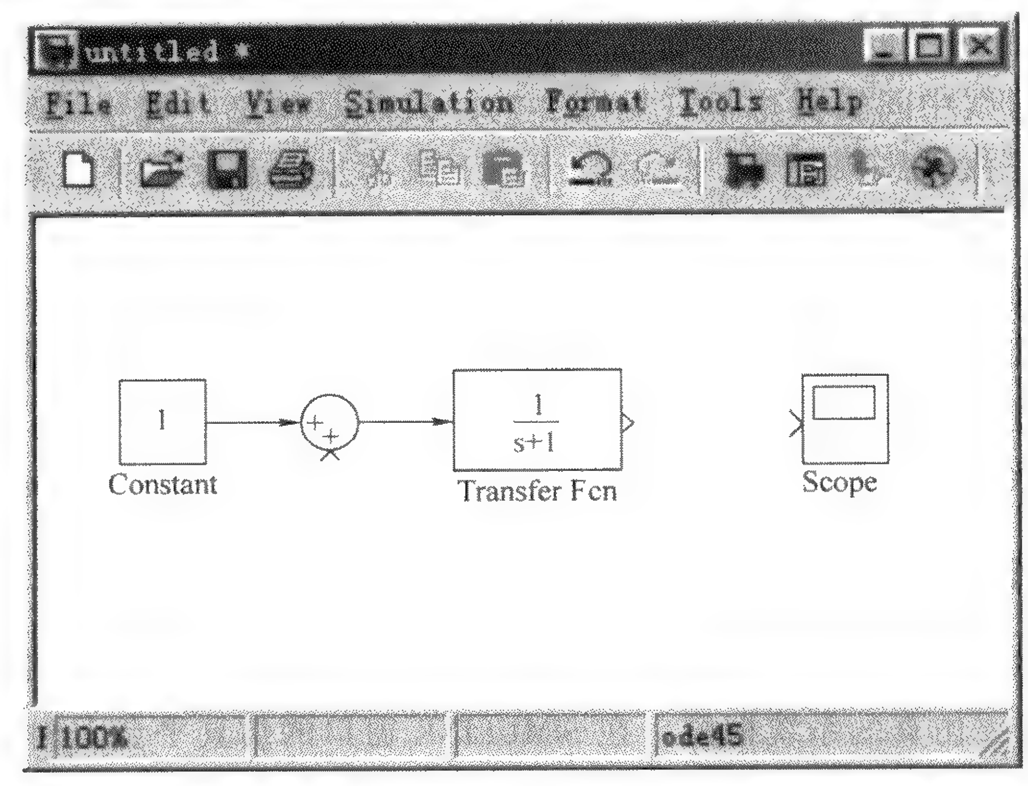


图 2-6　模块的连接之一

示了信号的流向（见图 2-6）。

如果要在信号线的中间拉出分支连接另一个模块（见图 2-7），可以先将光标移向需要分岔的地方，同时按下键盘中的 Ctrl 键和鼠标则可拖拉出一根支线，然后将支线引到另一输入端口松开鼠标即可。

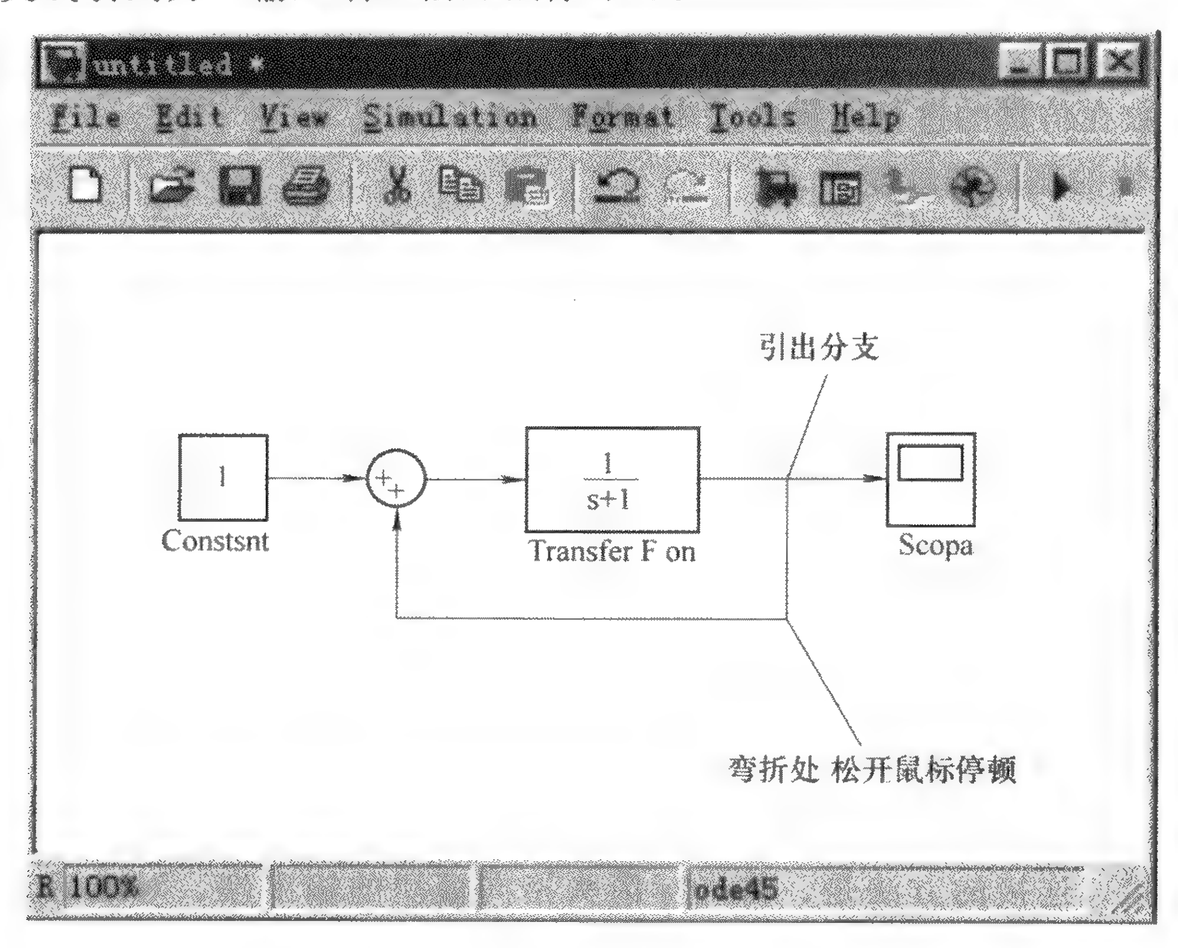


图 2-7 模块的连接之二

9. 信号线的弯折、移动和删除

如果信号线中间需要弯折（见图 2-7），只需要在拉出信号线时，在需要弯折的地方松开鼠标停顿一下，然后继续按下鼠标左键改变鼠标移动方向就可以画出折线。

要移动信号线的位置，首先是选中要移动的线条，将光标指向该线条后点击，线条上出现小黑块（见图 2-7）则表明该线已被选中，然后再将光标指向线条上需要移动那一段拖动鼠标即可。

若要删除已画好的信号线，只需在选中信号线后，按键盘中的 Delete 键即可。

2.1.3 SIMULINK 的仿真步骤

利用 SIMULINK 环境仿真一个系统的过程基本上可以分为如下几个步骤：

(1) 根据要仿真的系统框图，在 SIMULINK 窗口的仿真平台上构建仿真模型。此过程要首先打开 SIMULINK 窗口和模型浏览器，将需要的典型环节模块提取到仿真平台上，然后将平台上的模块一一连接，形成仿真的系统框图。一个完整

的仿真模型应该至少包括一个源模块（Sources）和一个输出模块（Sinks）。

(2) 设置模块参数。完成模块提取和组成仿真模型后，需要给各个模块赋值。这时，用鼠标双击模块图标，弹出模块参数对话框，并在对话框中输入模块参数，输入完成后点击 OK 按钮，对话框自动关闭，该模块的参数设置完成。

以上步骤参考前节“有关模块的操作”。

(3) 设置仿真参数。在对绘制好的模型进行仿真前，还需要确定仿真的步长、时间和选取仿真的算法等，也就是设置仿真参数。设置仿真参数可点击 SIMULINK 窗口的菜单上的 Simulation，在下拉的子菜单中点击 Simulation Parameters 命令或用键盘中的 Ctrl + E 键。这时弹出仿真参数设置的对话框，如图 2-8 所示。对话框中有 Solver、Workspace I/O Diagnostics、Advanced 和 Real-Time Workshop5 大项内容，其中最常需设置的是解算器“Solver”。

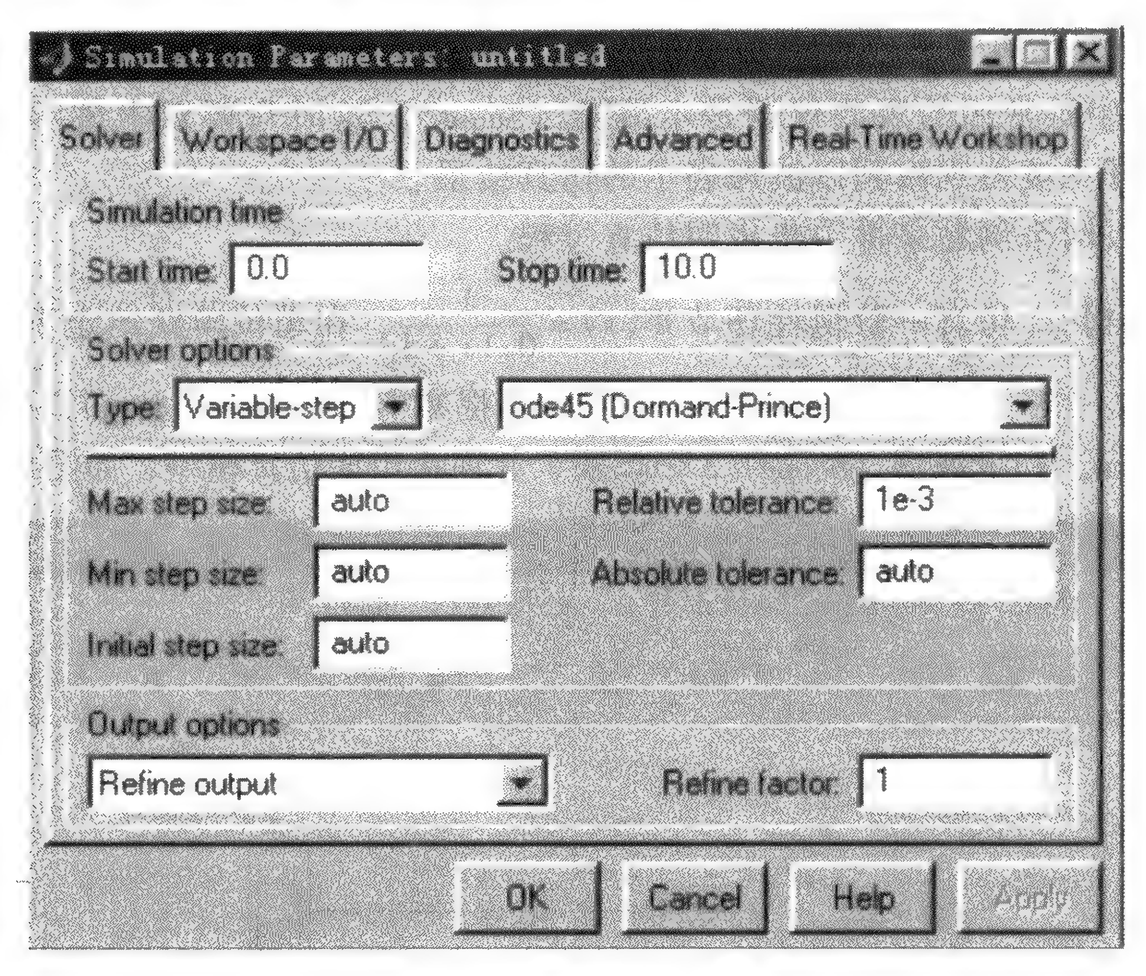


图 2-8　解算器的设置项目

图 2-8 展示了解算器的设置项目，其中仿真时间（Simulation time）有开始时间（Start time）和终止时间（Stop time）两项，连续系统中仿真时间一般从零开始，可以先预设一个仿真的终止时间，在仿真过程如果预设的时间不足，可以即时修改。算法选择（Solver options）中计算类型（Type）有可变步长（Variable-step）和固定步长（Fixed-step）两种，在可变步长和固定步长下还有多种数值计算方法可供选择，关于数值计算方法将在后面作进一步介绍。该栏中经常还要设置的有仿真误差，这有相对误差（Relative tolerance）和绝对误差（Absolute

tolerance）两项，系统默认的相对误差是 1/1000。选择合适的计算误差，对仿真的速度和仿真计算能否收敛影响很大，尤其在仿真不能收敛时，适当放宽误差可以取得效果，绝对误差一般可取“自动（auto)”。

（4）启动仿真。在模块参数和仿真参数设置完毕后即可以开始仿真，在 Simulation 菜单的子菜单中点击“Start”或用键盘中的 Ctrl + T 键即可进入仿真，更简单的方法是使用工具栏上的按钮“▶”。在模型的计算过程中，窗口下方的状态栏会提示计算的进程，对简单的模型这仅在一瞬间就完成了。在仿真计算中途，如果要修改模块参数或仿真时间等，则可以用 Simulation 菜单中的 Pause 命令或按钮⏸暂停仿真。暂停之后要恢复仿真，则再次点击按钮“▶”仿真就可以继续进行下去。如果中途要结束仿真可以点击按钮“■”或使用 Simulation 菜单中的 Stop 命令来终止仿真。

（5）观测仿真结果。在模型仿真计算完毕后重要的是观测仿真的结果，在 SIMULINK 中最常用的观测仪器是示波器（Scope)，这时只要双击该示波器模块就可以打开示波器观察到以波形表示的仿真结果。

下面以两个例题来进一步说明仿真过程。

【例 2-1】 仿真一阶惯性环节 $W(s)=\dfrac{1}{0.1s+1}$，在单位阶跃给定下的响应。

步骤 1：在 SIMULINK 的模型库中分别提取阶跃给定（Step)、传递函数（Transfer Fcn）和示波器（Scope）3 个模块，并连接组成仿真模型，如图 2-9 所示。

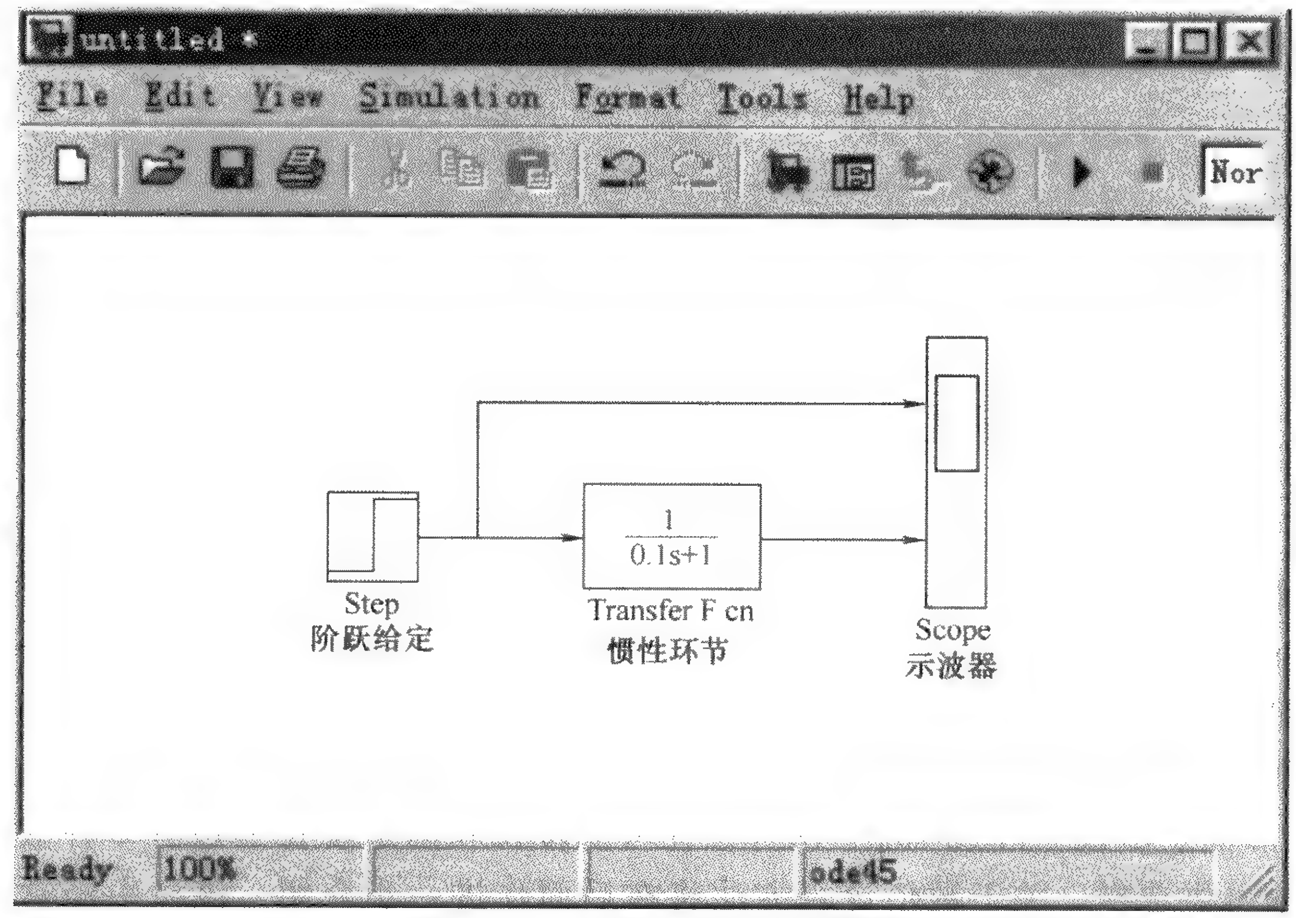


图 2-9　一阶惯性环节仿真模型

步骤 2：模块赋值。分别双击阶跃给定和传递函数两个模块，打开模块对话框，然后在框中设定其参数（见图 2-10 和图 2-11）。

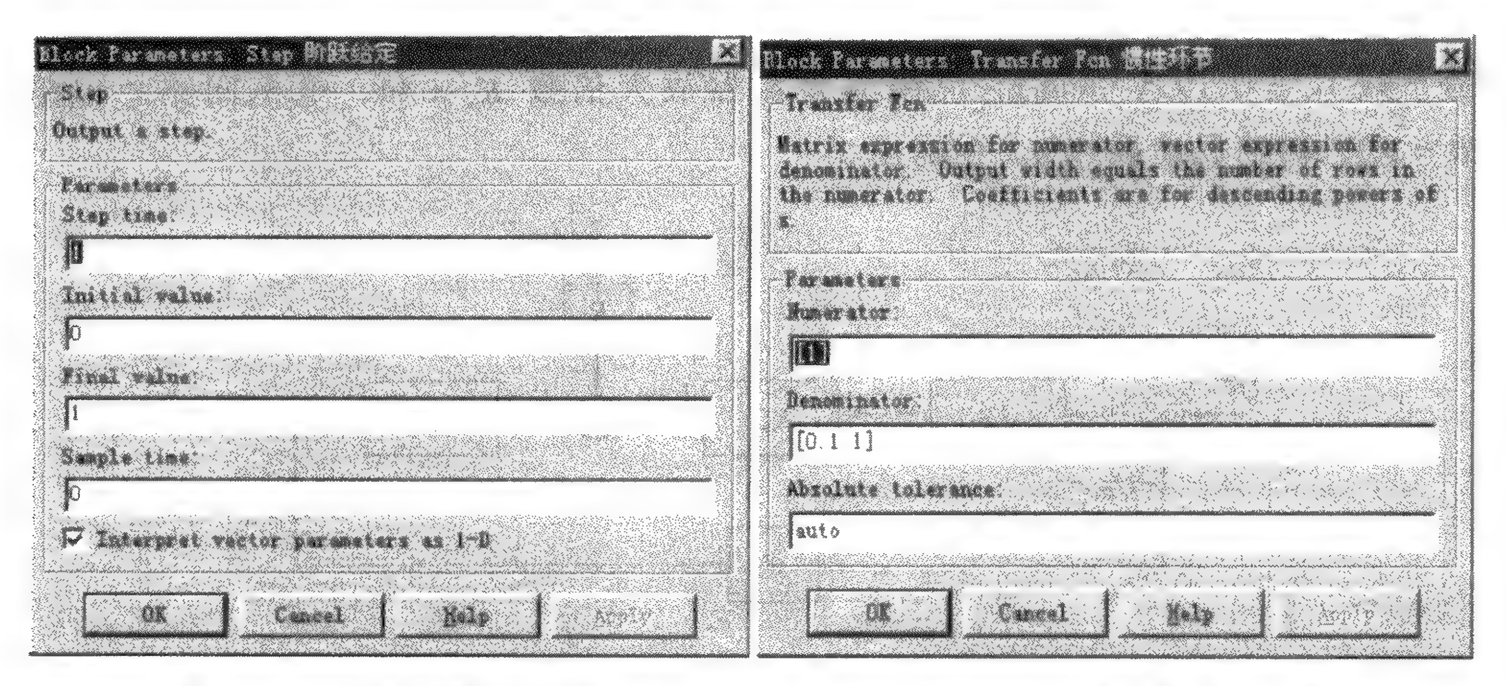


图 2-10　阶跃给定模块参数　　　　图 2-11　传递函数模块参数

步骤 3：设置模型仿真参数。在 Simulation 菜单下用 Simulation Parameters 命令打开仿真参数对话框，如图 2-12 所示，在对话框中仅设置了开始时间 0.8s 和终止时间 1.6s，其他参数保持了默认值。

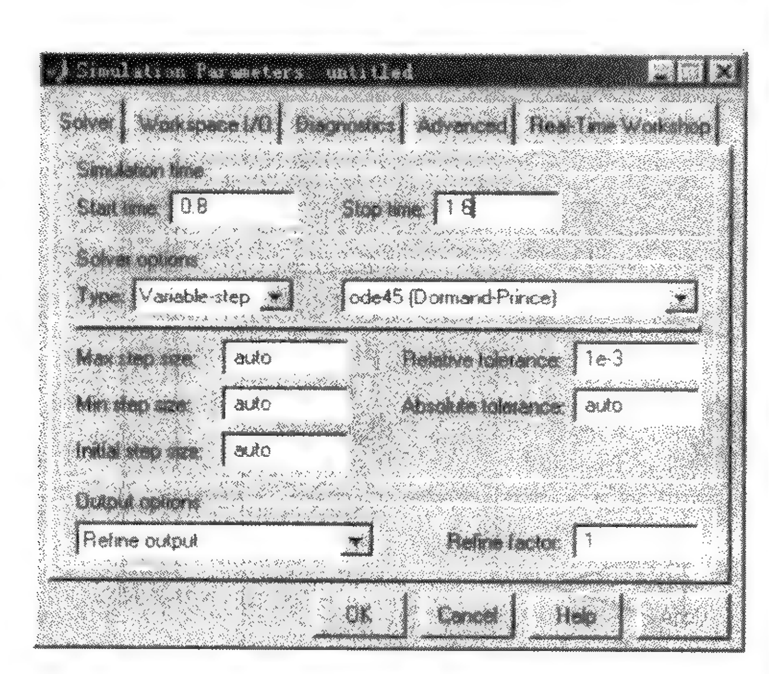


图 2-12　仿真参数设置

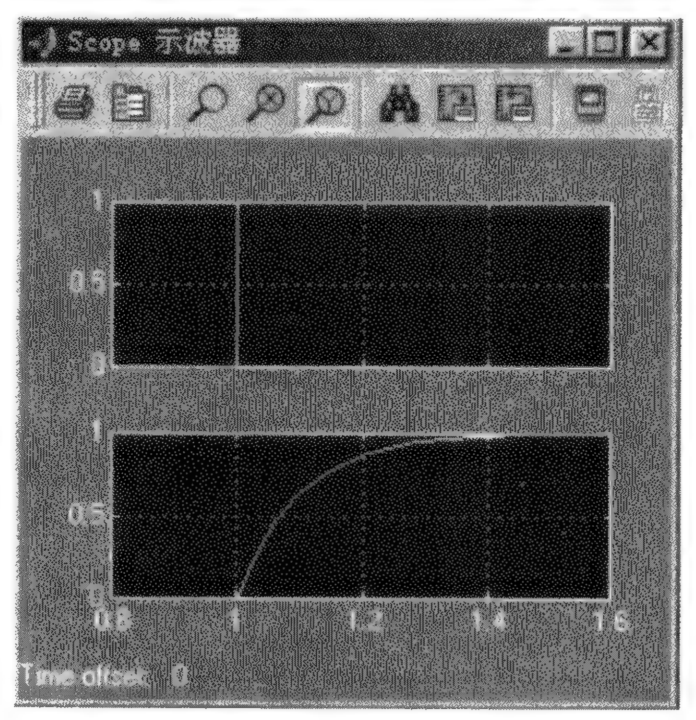


图 2-13　仿真结果

步骤 4：启动仿真并观察结果。在仿真参数设置完成后，点击按钮“▶”启动仿真，然后双击示波器模块打开示波器，打开示波器后可以看到一阶惯性环节对单位阶跃给定的响应曲线如图 2-13 所示，其中上图为单位阶跃给定的曲线，下图为一阶惯性环节的输出响应，可以看到在阶跃给定下，一阶惯性环节的输

出是按指数曲线上升的，并且仿真从0.8～1.6s。

【例 2-2】 转速反馈有静差直流调速系统的稳态结构如图2-14所示，仿真该系统的稳态特性。已知直流电动机额定参数为220V、55A、1000 r/min，电动势常数 $C_e=0.193\text{V}\cdot\text{min/r}$，晶闸管整流器放大倍数 $K_s=44$，电枢回路总电阻 $R=1\Omega$，转速反馈系数 $\alpha=0.0116$。

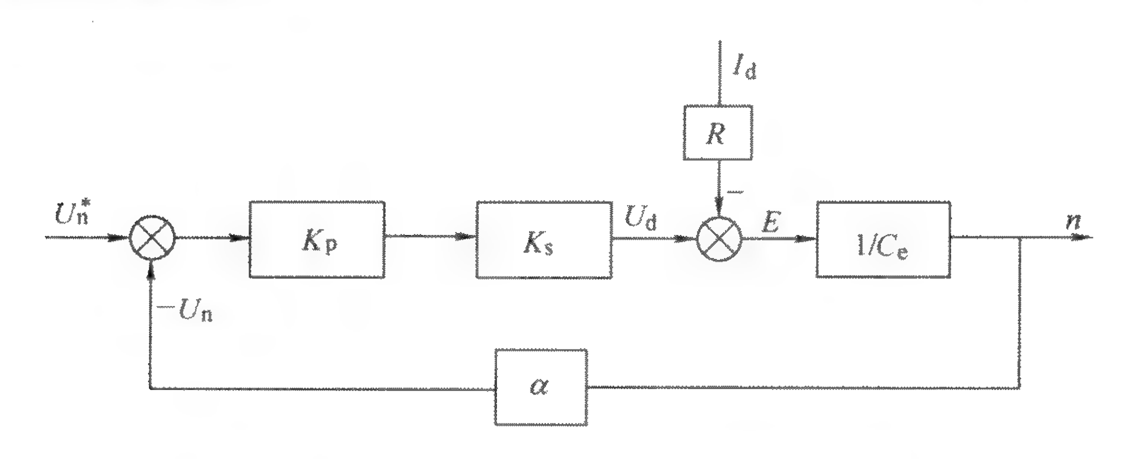


图 2-14 转速反馈直流调速系统稳态结构图

仿真该系统稳态特性，首先在仿真平台上构建仿真模型，如图2-15所示，该模型与系统的结构图基本相同，电流 I_d 的加载过程用斜坡函数（Ramp）模块

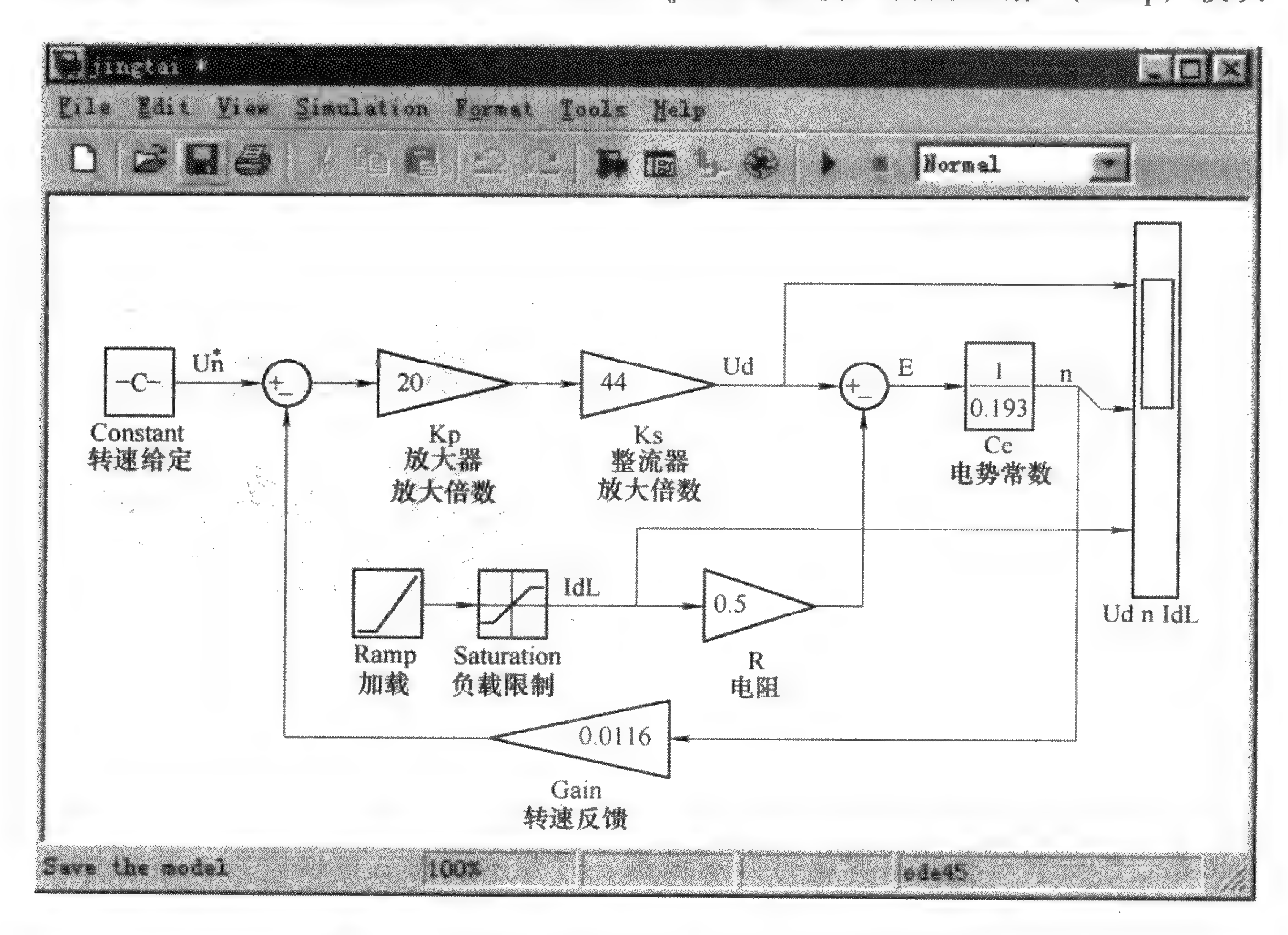
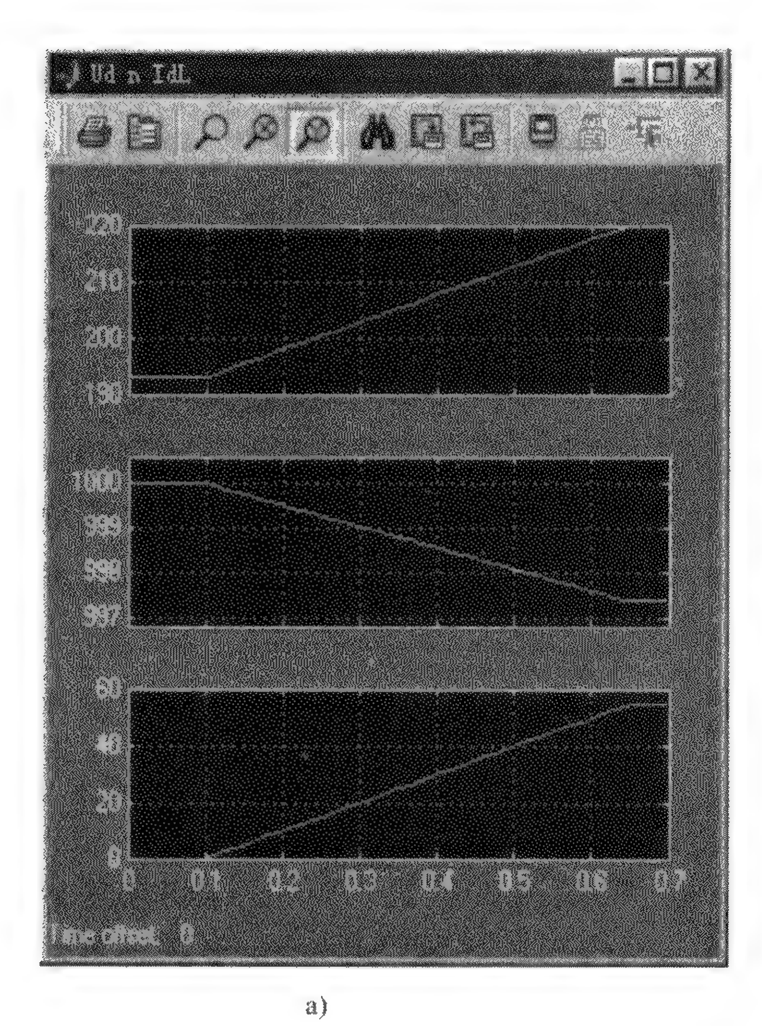


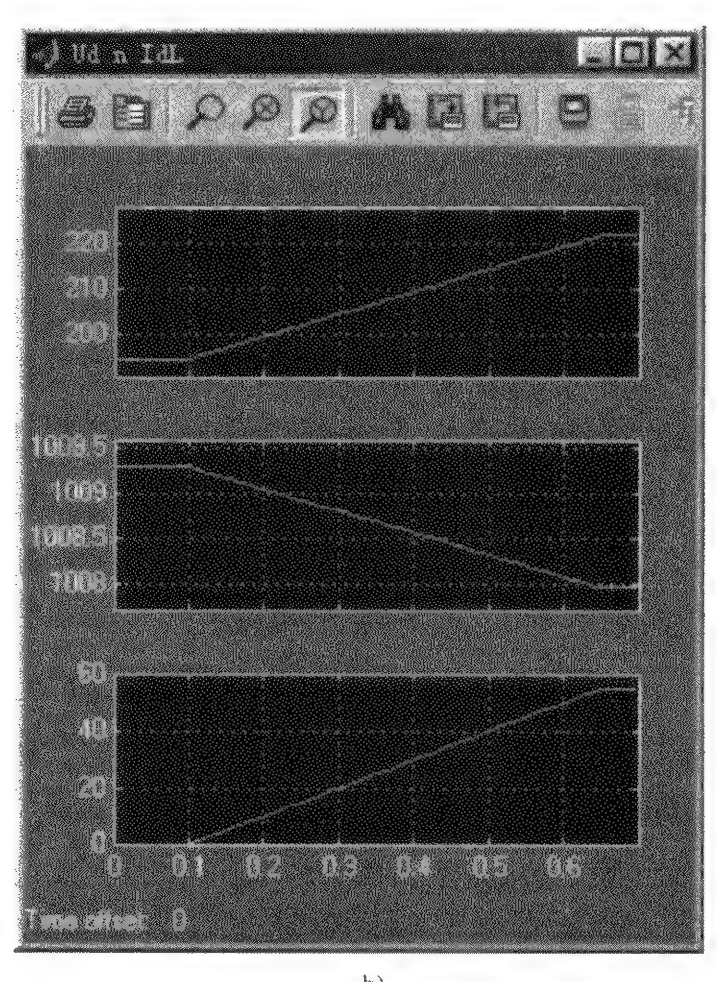
图 2-15 直流转速闭环调速系统稳态特性仿真模型

表示，也可以使用例 2-1 中的阶跃函数模块，设定斜坡函数的起始时间和上升斜率，可以控制系统加载时刻和加载速度，用饱和模块（Saturation）限制负载电流的大小。模型中取加载起始时间为 0.1s，上升斜率为 100。模型中用示波器观察整流器输出电压、转速和负载电流 3 项。

在模型中按已知条件代入模块参数，首次取放大器放大倍数 $K_p = 20$，在设定仿真时间为 0.7s 后启动仿真（其他仿真参数保持默认值），然后打开示波器可以观察电压、转速和负载电流的稳态曲线如图 2-16a 所示。在系统空载时（0.1s 加载前）整流器输出电压为 220V，转速为 1000r/min。随着负载电流的增加，转速略有下降，在 0.64s 时，电流达到额定值，这时的转速为 997.4r/min，系统的转速降为 $\Delta n = 2000\text{r/min} - 997.4\text{r/min} = 2.6\text{r/min}$。图 2-16b 所示为取 $K_p = 40$ 时系统的特性，从转速曲线可以看到，随着放大倍数的增加，系统的转速降减小，静特性的硬度增加，抗负载扰动的能力提高。



a)



b)

图 2-16　单闭环有静差直流调速系统稳态特性

a）$K_p = 20$　b）$K_p = 40$

上图—整流器输出电压　中图—转速　下图—负载电流

2.1.4 系统模型的保存和调用

画好的仿真模型可以保存起来，以便下次需要时可以直接调用，这可以使用 File 菜单下的 Save 命令或工具栏上的按钮。如果是一个新的尚未命名的仿真模型，这时系统会提示给模型命名，模型名的后缀为 .mdl。模型一般保存在 MATLAB 下的 work 文档中，当然也可以保存到其他地方。如果要调用一个已经存在的模型可以使用 File 菜单下的 Open 命令或菜单上的按钮。当然已经存在的模型或者修改后的模型也可以另外保存，这可以使用 File 菜单下的 Save as 命令，这时可以给模型定一个新的名字并保存起来。

2.1.5 SIMULINK 的仿真算法

在 SIMULINK 的仿真过程中选择合适的算法是很重要的，仿真算法是求常微分方程、传递函数、状态方程解的数值计算方法，这些方法主要有欧拉法(Euler)、阿达姆斯法（Adams)、龙格-库塔法（Rung-Kutta)，这些算法都主要建立在泰勒级数的基础上。欧拉法是最早出现的一种数值计算方法，它是数值计算的基础，它用矩形面积来近似积分计算，欧拉法比较简单，但精度不高，现在已经较少使用。阿达姆斯法是欧拉法的改进，它用梯形面积近似积分计算，所以也称梯形法，梯形法计算每步都需要经过多次迭代，计算量较大，采用预报-校正后只要迭代一次，计算量减少，但是计算时要用其他算法计算开始的几步。龙格-库塔法是间接使用泰勒级数展开式的方法，它在积分区间内多预报几个点的斜率，然后进行加权平均，用作计算下一点的依据，从而构造了精度更高的数值积分计算方法。如果取两个点的斜率就是二阶龙格-库塔法，取四个点的斜率就是四阶龙格-库塔法。

SIMULINK 汇集了各种求解常微分方程数值解的方法，这些方法分为两大类，可变步长类算法和固定步长类算法。

2.1.5.1 可变步长类算法

可变步长（Variable-step）类算法是在解算模型（方程）时可以自动调整步长，并通过减小步长来提高计算的精度。在 SIMULINK 的算法中可变步长类算法有如下几种：

1. ode45（Dormand-Prince）

基于显式 Rung-Kutta（4，5）和 Dormand-Prince 组合的算法，它是一种一步解法，即只要知道前一时间点的解 $y(t_{n-1})$，就可以立即计算当前时间点的方程解 $y(t_n)$。对大多数仿真模型来说，首先使用 ode45 来解算模型是最佳的选择，所以在 SIMULINK 的算法选择中将 ode45 设为默认的算法。

2. ode23（Bogacki-Shampine）

基于显式 Rung-Kutta（2，3）、Bogacki 和 Shampine 相结合的算法，它也是一种一步算法。在容许误差和计算略带刚性的问题方面，该算法比 ode45 要好。

3. ode113（Adams）

这是可变阶数的 Adams-Bashforth-Moulton PECE 算法，在误差要求很严时，ode113 算法较 ode45 更适合。ode113 是一种多步算法，也就是需要知道前几个时间点的值，才能计算出当前时间点的值。

4. ode15s（Stiff/NDF）

一种可变阶数的 Numerical Differentiation Formulas（NDFs）算法，它相对 Backward Differentiation Formulas 算法（简称 BDFs 算法，也称 Gear 算法）较好。它是一种多步算法，当遇到带刚性（Stiff）问题时或者使用 ode45 算法不行时，可以试试这种算法。

5. ode23s（Stiff/Mod. Rosenbrock）

这是一种改进的二阶 Rosenbrock 算法。在容许误差较大时，ode23s 比 ode15s 有效，所以在解算一类带刚性的问题时用 ode15s 处理不行的话，可以用 ode23s 算法。

6. ode23t（Mod. Stiff/Trapezoidal）

一种采用自由内插方法的梯形算法。如果模型有一定刚性，又要求解没有数值衰减时，可以使用这种算法。

7. ode23tb（stiff/TR-BDF2）

采用 TR-BDF2 算法，即在龙格-库塔法的第一阶段用梯形法，第二阶段用二阶的 Backward Differentiation Formulas 算法。从结构上讲，两个阶段的估计都使用同一矩阵。在容差比较大时，ode23tb 和 ode23t 都比 ode15s 要好。

8. discrete（No Continuous States）

这是处理离散系统（非连续系统）的算法。

2.1.5.2 固定步长类算法

固定步长类算法，顾名思义，是在解算模型（方程）的过程中步长是固定不变的，在 SIMULINK 的算法中固定步长类算法有如下几种：

1. ode5（Dormand-Prince）

采用 Dormand-Prince 算法，也就是固定步长的 ode45 算法。

2. ode4（Rung-Kutta）

四阶的龙格-库塔法。

3. ode3（Bogacki-Shampine）

采用 Bogacki-Shampine 算法。

4. ode2（Heun）

一种改进的欧拉算法。

5. ode1（Euler）欧拉算法

6. discrete（No Continuous States）

不含积分的固定步长解法，它适用于没有连续状态仅有离散状态模型的计算。

在仿真过程中，用户要根据各种类型的模型的特点，各种数值积分方法的计算特点和适用范围，才能正确地选择恰当的算法，而这一点往往是使用者难以掌握的，现在还没有一种对所有模型都适用的算法，一个简单的办法是当一种算法不能完成模型的计算时，选用另一种算法试试，毕竟 SIMULINK 已经编入了当今主要的各种数值计算方法，如果还是不行，那就要对模型或参数作一定的修改了。在电力电子电路和调速控制系统仿真中一般都使用可变步长类算法。

2.1.6 示波器的使用和数据保存

Sinks 模型库中有各种仪器仪表模块用来显示和记录仿真的结果，在仿真的模型图中必须有一个这样的模块，否则在启动仿真时会提示模型不完整。在这些仪器中，示波器（Scope）是最经常使用的，示波器不仅可以显示波形，并且可以同时保存波形数据。下面主要介绍示波器模块的使用。

双击示波器模块图标，即可弹出示波器的窗口画面（见图 2-17）。在画面上有一栏工具按钮，点击这些按钮就可以得到相应的功能。

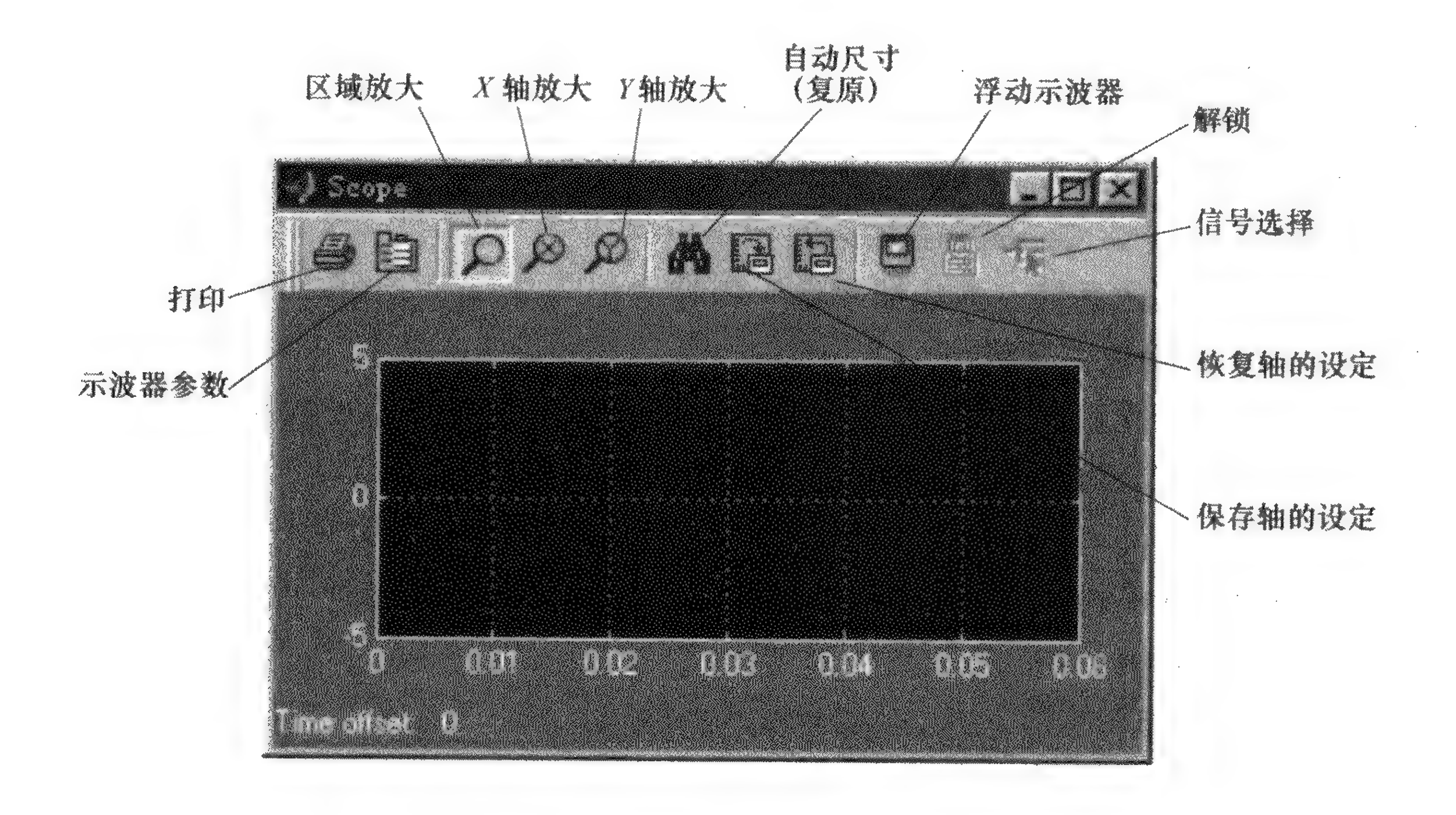
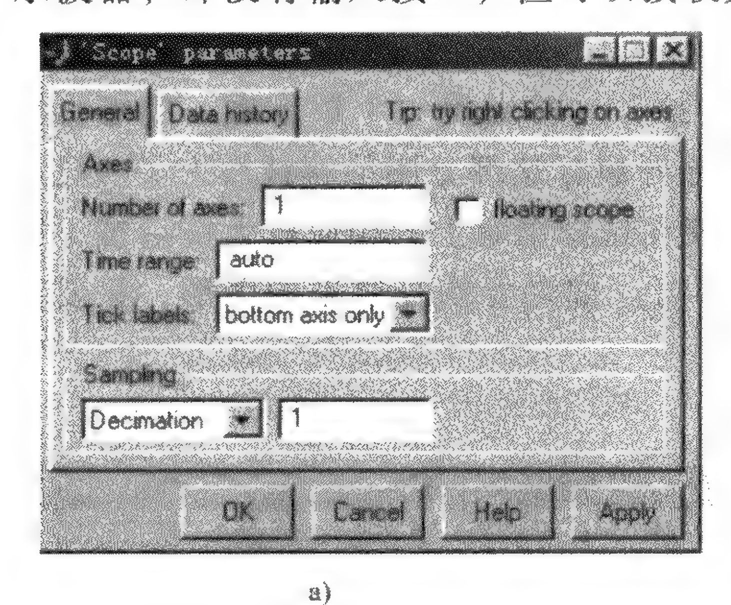


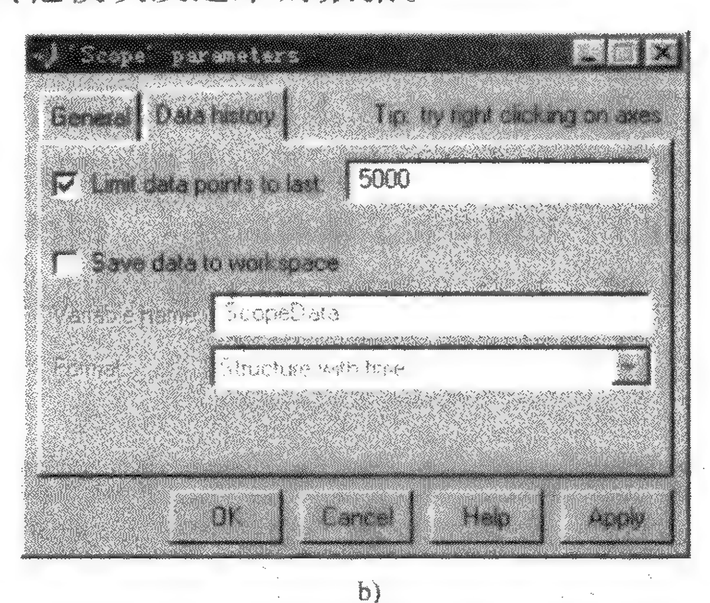
图 2-17　示波器画面

1. 示波器的参数

点击示波器参数按钮可以弹出示波器参数设置的对话框（见图 2-18）。在参数设置第一页（General），“Number of axes”项用于设定示波器的 Y 轴数量，即示波器的输入信号端口的个数，其预设值为“1”，也就是说该示波器可以用来观察一路信号，将其设为“2”，则可以同时观察两路信号，并且示波器的图标也自动变为有两个输入端口，依次类推，这样一个示波器可以同时观察多路信号。第二项“Time range”（时间范围），用于设定示波器时间轴的最大值，这一般可以选自动（auto），这样 X 轴就自动以系统仿真参数设置中的起始和终止时间作为示波器的时间显示范围。第三项用于选择标签的贴放位置。第四项用于选择数据取样方式，其中 Decimation 方式是当右边栏设为“3”时，则每 3 个数据取一个，设为“5”时，则是 5 中取 1，设的数字越大显示的波形就越粗糙，但是数据存储的空间可以减少。一般该项保持预置值“1”，这样输入的数据都显示，画出的波形较光滑漂亮。如果取样方式选 Sample time 采样方式，则其右栏里输入的是采样的时间间隔，这时将按采样间隔提取数据显示。该页中还有一项“Floating scope”选择，如果在它左方的小框中点击选中，则该示波器成为浮动的示波器，即没有输入接口，但可以接收其他模块发送来的数据。



a)



b)

图 2-18　示波器参数设置

a）示波器设置第一页　b）示波器设置第二页

示波器设置的第二页是数据页，这里有两项选择。第一项是数据点数，预置值是 5000，即可以显示 5000 个数据，若超过 5000 个数据，则删掉前面的保留后面的。也可以不选该项，这样所有数据都显示，在计算量大时对内存的要求高一些。如果选中了数据页的第二项“Save data to workspace”，即将数据放到工作间去，则仿真的结果可以保存起来，并可以用 MATLAB 的绘图命令来处理，也可以用其他绘图软件画出更漂亮的图形。在保存数据栏下，还有两项设置，

第一项是保存的数据命名（Variable name），这时给数据起一个名，以便将来调用时识别。第二项是选择数据的保存格式（Format），该处有 3 种选择：Arrary 格式适用于只有一个输入变量的情况；Structure with time 和 Structure 这两种格式适用于以矢量表示的多个变量情况，并且前者同时保存数值和时间，后者仅保存数值。用 Arrary 格式保存的变量，为了以后可以用 MATLAB 命令重画，同时需要将时间也保存起来，这时可以在模型平台上调用一个 Sources 模型库中的时钟模块（Clock），并将其连接一个示波器，用示波器的 Save data to workspace 功能将时间作为一个变量同时保存起来（见图 2-19）。

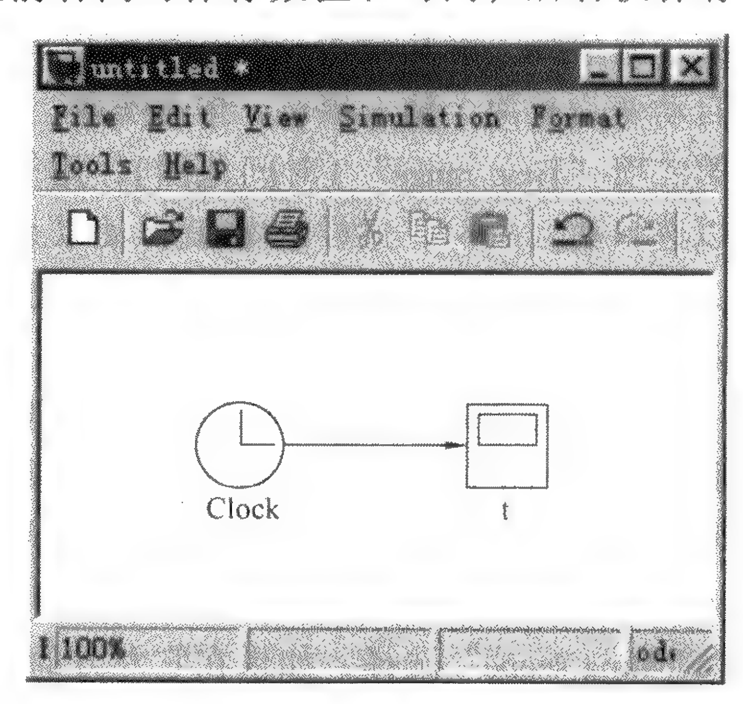
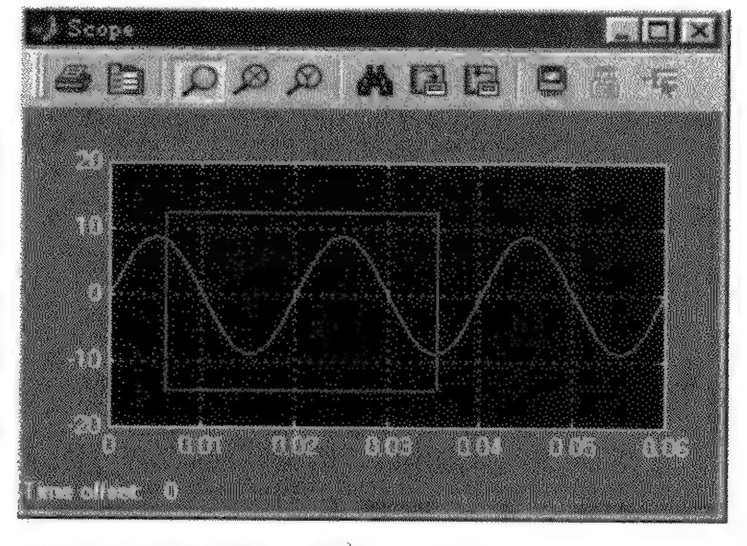


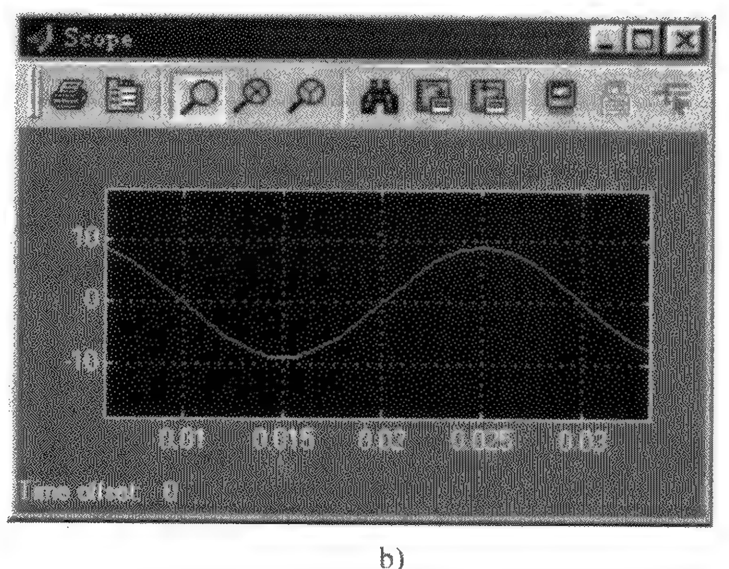
图 2-19　时间的保存

2. 图形缩放

在示波器窗口菜单上有 3 个放大镜，分别可以用于图形的区域放大、*X* 轴向和 *Y* 轴向的图形放大。区域放大，首先在菜单上点击区域放大镜，然后在需放大的区域上按下鼠标左键并斜向拖拉，这时出现一个矩形框，用矩形框框住需要放大的局部图形（见图 2-20a），松开鼠标这部分图形就被放大了（见图 2-20b）。*X* 轴向和 *Y* 轴向的放大，同样只要在选择菜单上的相应放大镜后按下鼠标左键，并沿 *X* 轴方向或 *Y* 轴方向拖拉即可。如果要恢复原来的图形，只要点击一下望远镜图标就可以了。



a)



b)

图 2-20　图形的放大

a）选取放大区间　b）放大后的图形

3. 坐标轴范围

示波器显示的变量一般是时间的函数，所以图形的 X 轴一般是时间，Y 轴是对应的变量值。X 轴和 Y 轴的最大取值范围一般是自动设置的，利用放大镜功能可以在 X 轴和 Y 轴的范围内选取其中的一部分显示，但有时需要将 Y 轴的最大范围再扩大一些，以便使图形处于窗口的中间。这可以在 Scope 窗口的图形部分点击鼠标右键，在弹出的功能菜单中选择“axes properties…”项，则可以打开 Y 轴范围限制的对话框（见图 2-21），在对话框中重新设置 Y 轴范围，并还可以给显示信号命名。

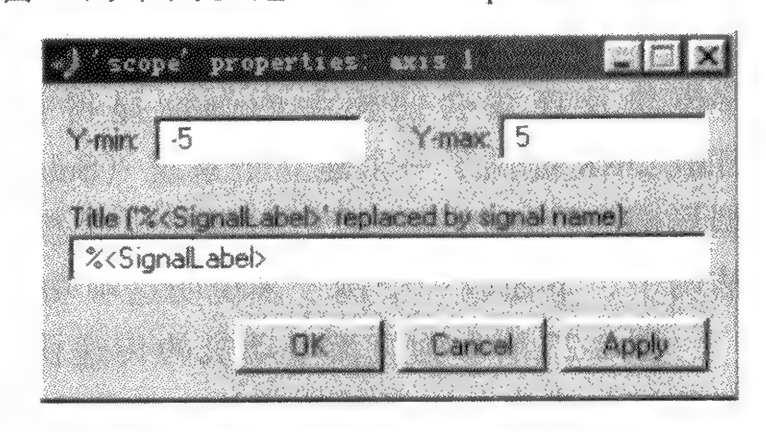


图 2-21　Y 轴范围设定

4. 浮动示波器（floating scope）

浮动示波器是示波器使用的一项特殊功能，它不需要将示波器与外部模块用线连接，就可以选择示波器的显示信号，使用是很方便的。将一个示波器变为浮动示波器，只要在示波器参数页上选中“floating scope”选项（见图 2-18a），关闭参数对话框后，示波器图标的输入端口就没有了，这时该普通示波器就改变为一个浮动示波器。也可以从 Sinks 模型库中直接调用 floating scope 模块，效果是相同的。在仿真模型图上放置一个浮动示波器模块后，双击模块图标出现示波器窗口，在窗口的图形区域用右键单击，在弹出的功能项中选择“Signal Selector”栏，则可以打开信号选择对话框（见图 2-22），对话框右边列出了可供

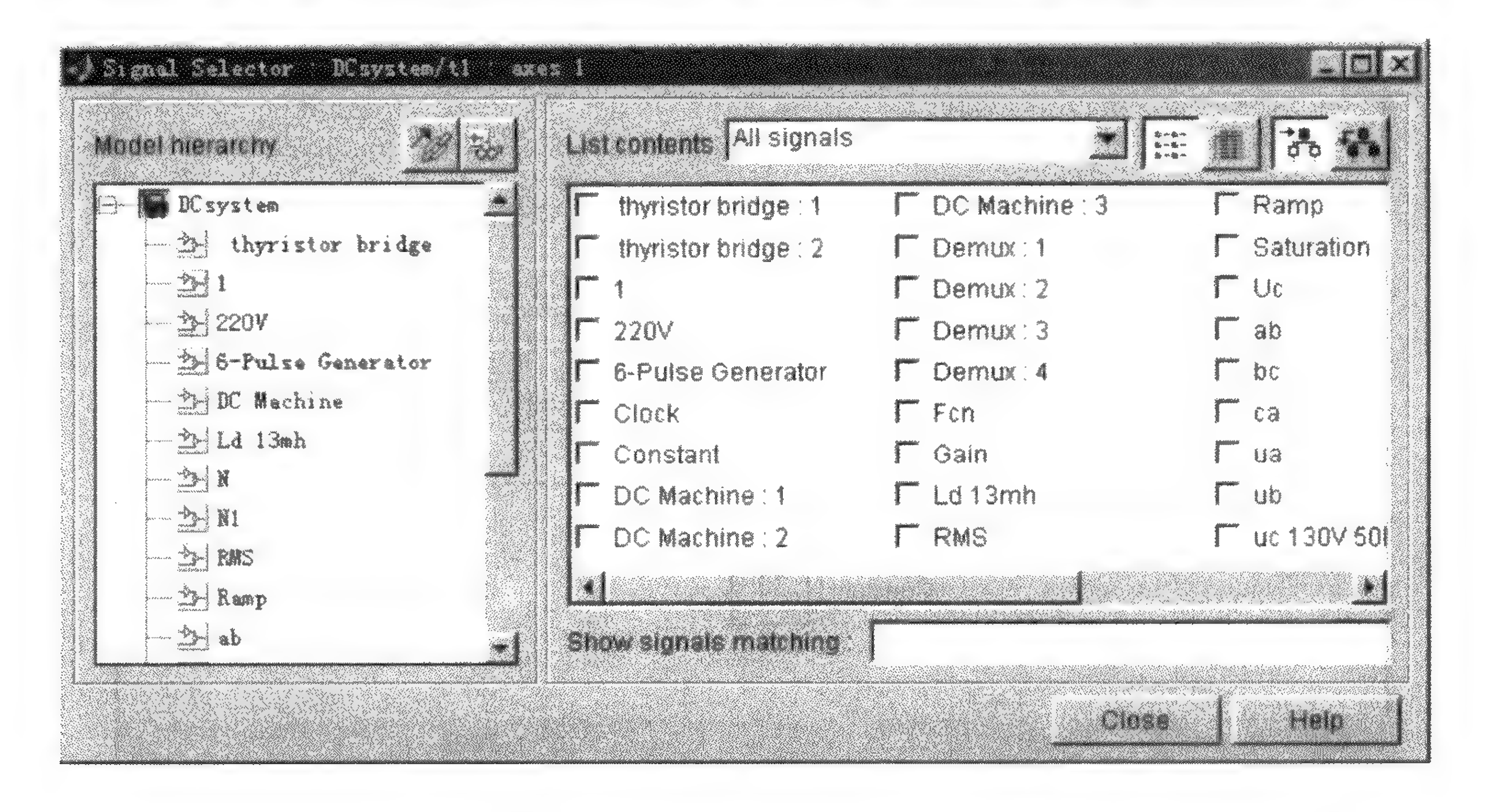


图 2-22　浮动示波器显示信号选择对话框

显示的信号名称，在信号名前的小方框（□）内打“√”，则可以在示波器上观察该信号。

2.1.7 建立子系统和系统模型的封装

2.1.7.1 建立子系统

在 SIMULINK 的仿真中，一个复杂系统的模型将由许多基本模块组成，这么多模块及连线会使模型的画面显得很凌乱，甚至在一个平台上难以表达。SIMULINK 提供了一个建立子系统（Subsystem）的功能，利用这项功能可以将模型局部的模块及其连线打包后用一个模块图标来表示，使整个模型画面变得简洁明了，下面以一个例子来说明这项功能的使用方法。

图 2-23 所示为直流电动机的传递函数模型，现在需要将直流电动机的传递函数打包成为一个子系统模块。首先在模型平台上点下鼠标拖拉出一个虚线框，将需要打包的模块都包含在虚线框内，松开鼠标，这时虚线框内的模块和线条都被选中。然后在 Edit 菜单中选 Create Subsystem（创建子系统）命令，选择后画面则变为图 2-24，这时图 2-23 中虚线框内的模型部分就已经打包为一个子系统模块，模块名为 Subsystem，它有两个输入端和一个输出端。创建子系统后的模型可能不会如图 2-24 所示那样整齐，可以用移动模块和连线的方法，重新进行调整。

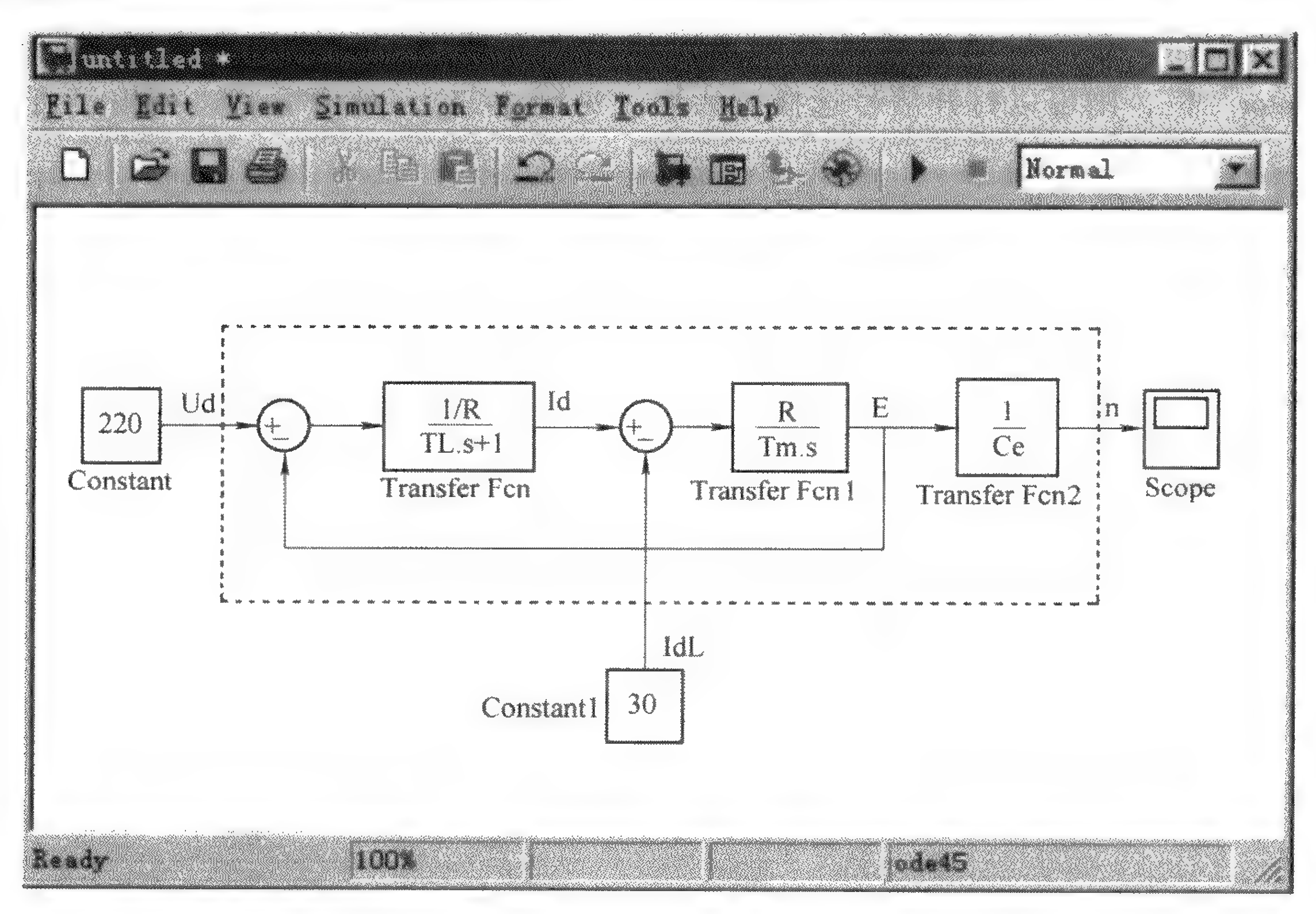


图 2-23 创建子系统功能说明一

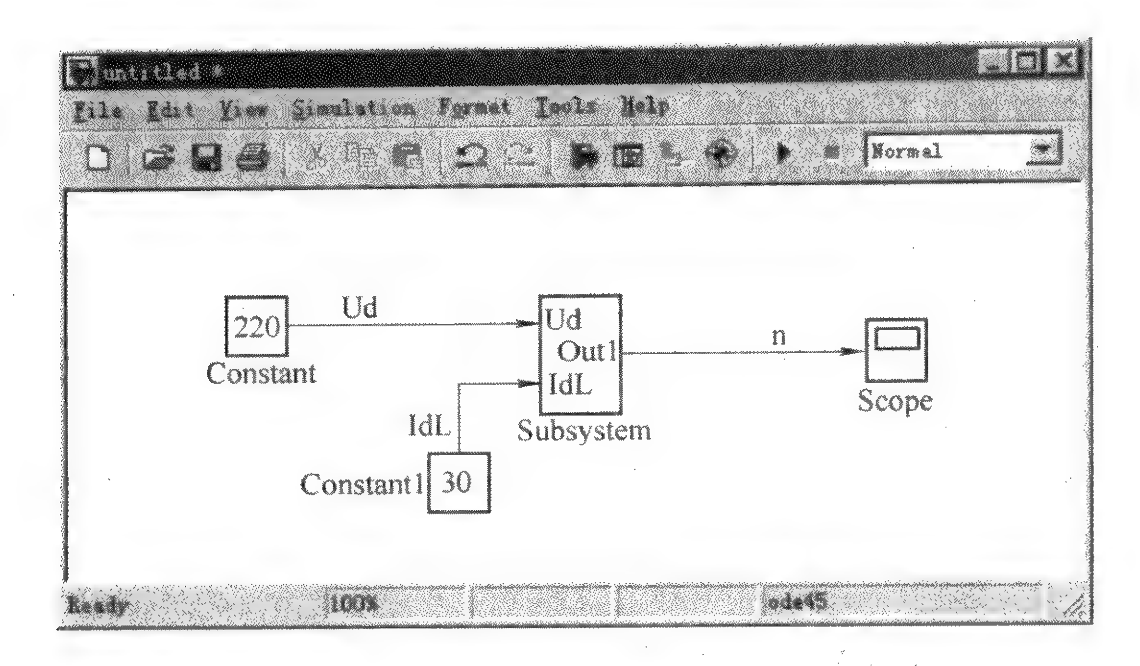


图 2-24　创建子系统功能说明二

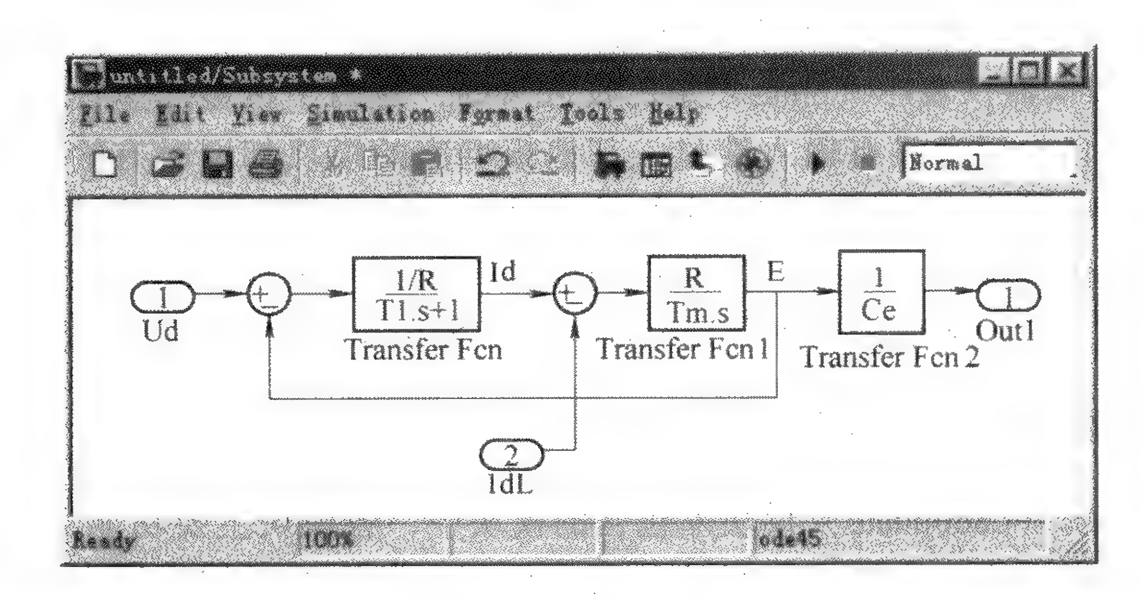


图 2-25　重新打开的子系统

建成的子系统模块可以重新命名，命名的方法与基本模块的命名方法相同。如果需要打开这个子系统模块，只要双击该子系统模块图标即可。重新打开的子系统如图 2-25 所示，打开子系统模块后，可以给子系统内的各模块设置参数，还可以进行修改模块名称等操作。关闭子系统只要点击窗口右上角的关闭按钮即可。子系统关闭时，对子系统内模块做的参数设置和名称修改等同时保存下来。

子系统模型是允许嵌套的，也就是说一个子系统内还可以包含有二级子系统模块，多层嵌套，可以组成很复杂的子系统。

子系统模块可以复制，并转移到其他仿真模型中去使用，这和一般普通模块的复制、粘贴和移动是一样的。

2.1.7.2　子系统模型的封装

在建立子系统后，若要给子系统内的模块设置参数，必须首先打开子系统，

然后再逐个打开模块参数对话框输入参数。实际上给子系统赋值，往往只需要修改其中几个模块的某几项参数，现在要一一打开，显得很麻烦，尤其是含有嵌套的子系统。因此 SIMULINK 提供了子系统的封装（Mask）功能，也就是将子系统中各模块常要修改的参数集中在一张表上，方便子系统的使用。封装子系统需要在选中该子系统模块后，在模型窗口 Edit 菜单中选择 Mask subsystem 命令，就会弹出 Mask 编辑器窗口，然后在编辑器窗口内输入相关信息，更详细的操作请看帮助（Help）文件。

实际上 SIMULINK 模型库中的大量基本模块，如 PID 模型等也是由底层的基础模型组成的子系统，然后经封装后得到的模块。

2.2 SIMULINK 模型库中的模块

在模型浏览器中属于 SIMULINK 名下的模型有 9 大类，其中激励源模型库（Sources）和仪器仪表库（Sinks）是比较特殊的，这两个模型库里面的模块前者只有输出端口，后者只有输入端口。其他模型库的模块都同时有输入和输出两种端口，这些模块用来组成仿真系统的本体，而激励源模型库的模块则用来为仿真系统提供各种输入信号，仪器仪表库的模块则用于观测或记录系统在输入信号作用下产生的响应。以下分别介绍各模型库中包含的典型环节模块。

2.2.1 连续系统模块库

连续系统（Continuous）模块库包含的模块中，各模块主要功能见表 2-7。该模块库主要用来构建连续控制系统的仿真模型，模块的详细使用方法可以查看帮助文件。

表 2-7 连续系统模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Derivative（微分运算）	对输入信号的微分运算
2	Integrator（积分运算）	对输入信号的积分分运算
3	Memory（记忆）	输出为上一步的输入值
4	State-space 状态方程	建立状态方程
5	Transfer Fcn（多项式传递函数）	分子分母以多项式表示的传递函数
6	Transfer Delay（延迟）	输入信号延迟一个给定时间后输出
7	Varible Transfer Delay（可变延迟）	输入信号延迟输出的时间是可变的
8	Zero-Pole（零极点传递函数）	以零极点表示的传递函数

2.2.2 离散系统模块库

离散系统（Discrete）模块库中包含的模块见表 2-8，模块主要功能见表 2-9。离散系统模块库功能基本上与连续系统模块库相对应，只不过离散系统模块库是对离散信号的处理。

表 2-8 离散系统模块库模块图标和名称

$\frac{1}{z+0.5}$ Discrete Transfer Fcn	$\frac{(z-1)}{z(z-0.5)}$ Discrete Zero–Pole	$\frac{1}{1+0.5z^{-1}}$ Discrete Filter	y(n)=Cx(n)+Du(n) x(n+1)=Ax(n)+Bu(n) Discrete State–Space
离散传递函数	离散零极点传递函数	离散滤波器	离散状态方程
$\frac{T}{z-1}$ Discrete–Time Integrator	First–Order Hold	Zero–Order Hold	$\frac{1}{z}$ Unit Delay
离散时间积分器	一阶保持器	零阶保持器	单位延迟

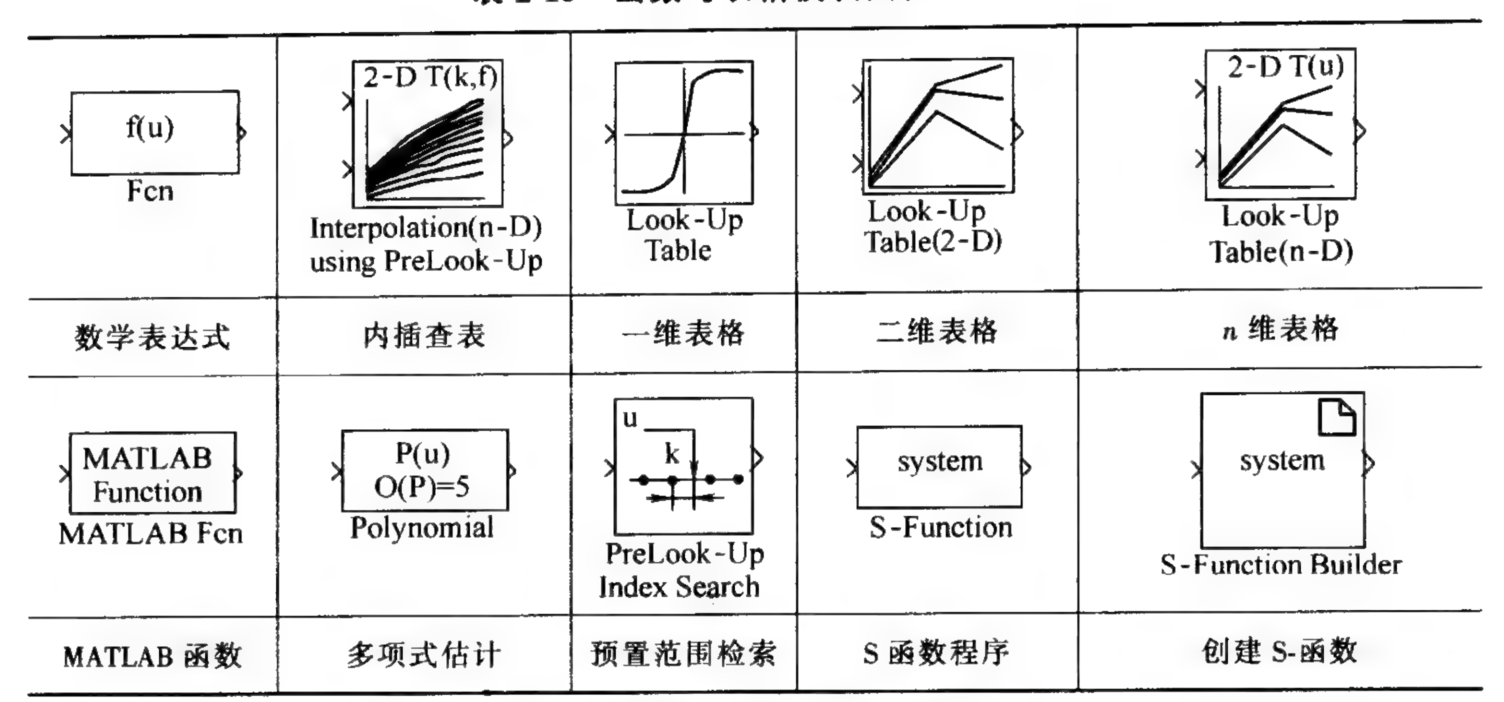
表 2-9 离散系统模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Discrete Transfer Fcn（离散传递函数）	表达一个离散的传递函数
2	Discrete Zero-Pole（离散零极点传递函数）	表达一个零极点形式的离散传递函数
3	Discrete Filter（离散滤波器）	建立一个离散的滤波器
4	Discrete State-Space（离散状态方程）	建立离散的状态方程
5	Discrete-time Integrator（离散时间积分器）	输出为输入信号的离散时间积分
6	First-Order Hold（一阶保持器）	一阶保持器
7	Zero-ORDER hold（零阶保持器）	零阶保持器
8	Unit Delay（单位延迟）	信号采样后保持一个采样周期后再输出

2.2.3 函数与表格模块库

使用函数与表格（Functions & Tables）模块库内的模块可以在系统模型中插入 M 函数、S 函数，以及各种方式建立的表格，使系统的仿真功能更强大。库中包含的模块见表 2-10，模块的主要功能说明见表 2-11。该模块库还不断有所增加。

表 2-10　函数与表格模块图标与名称



f(u) Fcn	2-D T(k,f) Interpolation(n-D) using PreLook-Up	Look-Up Table	Look-Up Table(2-D)	2-D T(u) Look-Up Table(n-D)
数学表达式	内插查表	一维表格	二维表格	*n* 维表格
MATLAB Function MATLAB Fcn	P(u) O(P)=5 Polynomial	u k PreLook-Up Index Search	system S-Function	system S-Function Builder
MATLAB 函数	多项式估计	预置范围检索	S 函数程序	创建 S-函数

表 2-11　函数与表格模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Fcn（数学表达式）	自定义数学表达式
2	Interpolation（n-D）using PreLOOK-Up（内插法查表）	根据输入，用内插的方式得到输出，插值的方法可选常数内插和线性内插
3	Look-up Table（一维表格）	建立多种形式的表格，根据输入查表决定输出
4	Look-up Table（2-D）（二维表格）	
5	Look-up Table（n-D）（*n* 维表格）	
7	MATLAB Fcn（MATLAB 函数）	调用 MATLAB 函数
7	Polynomial（多项式估计）	执行 MATLAB 的 Polyval 命令
8	PreLook-Up Index Search（预置范围检索）	对于一组间断的数据，采用均匀间隔、线性或者二元检索的方法确定输出
9	S-Function（S 函数程序）	调用由 S 函数编写的程序
10	S-Function Builder（创建 S-函数）	调用一个打包的创建 S-函数或 C 语言编制的文件，并支持连续和离散的状态

2.2.4　数学运算模块库

数学运算（Math）模块库中的模块用来完成各种数学运算，包括加、减、乘、除以及复数计算、逻辑运算等等。模块图标与名称见表 2-12，模块主要功能见表 2-13。

表 2-12　数学运算模块图标与名称

Abs	Dot Product	Gain	Logical Operator	Math Function	MinMax	Product
取绝对值	计算点积	放大器	逻辑运算	数学函数	取极值	乘法运算
Relational Operator		Trigonometric Function	Complex to Magnitude-Angle	Complexto Real-Imag	Magnitude-Angle to Complex	Real-Imagto Complex
比较运算	信号综合	三角函数	取复数模和复角	取复数的实部、虚部	复数表示模和复角	实部、虚部以复数表示
Algobraic Constraint	Combinatorial Logic	Matrix Gain	Slider Gain	Matrix Gain	Sign	
代数环限制	逻辑真值表	矩阵增益	滑动增益	矩阵放大器	取输入信号的符号	

表 2-13　数学运算模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Abs（取绝对值）	取输入信号的绝对值或模
2	Dot Product（计算点积）	输出 y = sum（conj［u1］＊u2）
3	Gain（放大器）	输出为输入信号乘增益
4	Logical Operator（逻辑运算）	与、或、非等逻辑运算符
5	Math Function（数学函数）	指数、对数、平方等数学运算
6	MinMax（取极值）	取输入信号的极大、极小值
7	Produt（乘除运算）	多路输入信号的乘除运算
8	Relational Operator（比较运算）	<、>、= 等运算
9	Sum（信号综合）	综合多路信号
10	Trigonometric Function（三角函数）	三角函数的计算
11	Complex to Magnitude-Angle（取复数模和复角）	输出分别是复数的模和复角
12	Real-Imag Function（取复数的实部、虚部）	输出分别是复数的实部和虚部
13	Magnitude-Angle to Complex（模和复角以复数表示）	将输入模和复角写成复数形式输出
14	Real-Imag to Complex（实部、虚部以复数表示）	将输入的实部和虚部写成复数形式输出

（续）

序号	模 块 名	主要功能
15	Matrix Gain（矩阵增益）	输入矩阵乘以放大倍数
16	Algebraic Constraint（代数环限制）	通过代数环的限制，改良代数环路的计算
17	Combinatorial Logic（逻辑真值表）	建立一张逻辑真值表，输出按输入查表
18	Slider Gain（滑动增益）	在一定范围内可以调节增益大小
19	Rounding Function（取整函数）	输出为输入的整数部分
20	Sign（取输入信号的符号）	取输入信号的符号，输出为正或负

2.2.5 非线性系统模块库

非线性系统（Nonlinear）模块库中的模块用于模拟各种非线性环节，模块图标与名称及其主要功能分别见表 2-14 和表 2-15。

表 2-14 非线性系统模块图标与名称

Dead Zone	Manual Switch	Quan tizer	Rate Limiter	Relay
死区	两位开关	阶梯信号	斜坡函数	滞环控制
Saturation	Switch	Backlash	Multiport Switch	Coulomb & Viscous Friction
饱和限制	可控开关	间隙	多位开关	库伦和粘滞摩擦

表 2-15 非线性系统模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Dead Zone（死区）	设定死区范围
2	Switch（两位开关）	手动开关，双击该开关模块，输出即改变输入的位置
3	Quantizer（阶梯信号）	根据输入产生阶梯输出信号
4	Rate Limiter（斜坡函数）	限制输入信号的上升和下降的变化率
5	Rely（滞环控制）	模拟带滞环特性的继电器环节
6	Saturation（饱和限制）	设置输出的正负限幅值，模拟环节的饱和特性
7	Switch（可控开关）	根据门槛电压，选择开关的输出
8	Backlash（间隙）	模拟间隙非线性环节（如齿轮）
9	Multiport Switch（多位开关）	根据第一输入状态，选择开关的输出
10	Coulombic & Viscous Friction（库伦和粘滞摩擦）	模拟含有粘滞和静摩擦特性的非线性环节

2.2.6 信号与系统模块库

信号与系统（Signals & System）模块库的模块图标与名称及其主要功能见表 2-16 和表 2-17。该模块库有强大的功能，使用该模块库模块，可以进行复杂系统的仿真。

表 2-16 信号与系统模块图标与名称

Assignment	Bus Creator	Bus Selector	Data Store Memory	Data Store Read	Matrix Concatenation
输入信号重组	总线输入	总线输出	数据存储器	读数据	将输入变为矩阵输出
Data Store Write	Data Type Conversion	Mux	Demux	From	Merge
写入数据	数据类型转换	信号合成	信号分解	接收信号	汇合输入信号
Function-Call Generator	Goto	Goto Tag Visibility	Hit Crossing	IC	Model Info
重复操作	接收指定信号并发送	连接 Goto 和 Form 模块	信号穿越值设定	初始值设定	模型的提示信息
Probe	Reshape	Selector	Width	Signal Specification	
取输入信号特征	改变输入信号维度	选择器	取输入信号的宽度	给定输入信号的格式	

表 2-17 信号与系统模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Assignment（重组）	输入信号次序重新组合后输出
2	Bus Creator（总线输入）	将多路信号输入总线输出
3	Bus Selector（总线输出）	总线信号分解为多路输出
4	Data Store Memory（数据存储器）	定义数据存储器
5	Data Store Read（读数据）	从数据存储器读出数据
6	Date Store Write（写入数据）	将数据写入存储器

（续）

序号	模 块 名	主要功能
7	Matrix Concatenation（将输入变为矩阵输出）	将输入信号转换为矩阵形式输出
8	Data Type Conversion（数据类型转换）	将输入信号转换为十进制、二进制、八进制等输出，并有自动方式
9	Mux（信号合成）	将输入的多路信号（标量、矢量、矩阵）汇入总线输出
10	Demux（信号分解）	将总线信号分解后输出
11	From（接收指定信号）	从 Goto 模块接收信号并输出
12	Merge（汇合输入信号）	合并多路输入信号为单一输出
13	Function-call Generator（重复操作）	在指定的（采样）时间内，规定重复操作的次数
14	Goto（接收指定信号并发送）	接收信号并发送到标签相同的 From 模块
15	Goto Tag Visibility（连接和 Form 模块）	定义 Goto 模块的标签
16	Hit Crossing（信号穿越值设定）	检测信号穿越设定值的点，穿越时输出置“1”
17	IC（初始置设定）	为信号设置初始值
18	Model Info（模型的提示信息）	在仿真模型上用该模块写上模型和提示信息
19	Probe（取输入信号特征）	取输入信号的宽度、维度、采样时间等信息
20	Reshape（改变输入信号维度）	可以修改一个矢量或矩阵输入信号的维度
21	Selector（选择器）	建立输入和输出信号之间的匹配连接关系
22	Width（取输入信号的宽度）	取输入信号的宽度
23	Signal specification（信号属性）	指定信号线的维度、采样时间、时间类型、信号类型等属性

2.2.7 仪器仪表模块库

仪器仪表（Sinks）模块库有九种显示和记录仪器仪表，用于观察信号波形或记录信号。仪器仪表模块库中的模块图标与名称及其主要功能见表 2-18 和表 2-19。

表 2-18 仪器仪表模块图标与名称

Scope	Floating Scope	1 Out1	Terminator	Display
示波器	浮动示波器	分支系统输出	信号终端	数字显示
Sim out To Workspace	XY Graph	STOP Stop Simulation	untitled mat To File	
信号写入工作间	函数记录仪	终止仿真	时间和信号记入 .mat 文件	

表 2-19 仪器仪表模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	Scope（示波器）	观察输入信号波形
2	Floating Scope（浮动示波器）	可以选择显示的信号（基本同 Scope）
3	Out1（分支系统输出）	分支系统输出端子
4	Terminator（信号终端）	用以封闭信号
5	Display（数字显示）	将信号以数字方式显示
6	To Workspace（信号写入工作间）	将信号写入工作间，以便用 MATLAB 命令处理
7	XY Graph（函数记录仪）	将输入作为 *X*/*Y* 轴变量绘图
8	Stop Simulation（终止仿真）	满足条件即终止仿真
9	To File（时间和信号记入 .mat 文件）	将输入的信号和时间记入后缀为 .mat 的文件

2.2.8 信号源模块库

信号源（Sources）模块库提供了多达 14 种的信号发生器，用于产生系统的激励信号，并且可以从工作间或 .mat 文件读入信号数据。信号源模块库的模块图标与名称及其主要功能分别见表 2-20 和表 2-21。

表 2-20 信号源模块图标与名称

Pulse Generator	Ramp	Signal Generator	Band-Limited White Noise	Random Number	
脉冲发生器	斜坡输出	信号发生器	白噪声	标准的随机信号	
Sine Wave	Step	Repeating Sequence	Chirp Signal	Uniform Random Number	
正弦波信号	阶跃信号	锯齿波发生器	调频信号	重复的随机信号	
Clock	12:34 Digital Clock	simin From Workspace	untitled.mat From File	Ground	1 In1
时钟	数字时钟	从工作间输出数据	从 .mat 文件输出数据	接地端	分支系统输入端

表 2-21 信号源模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	Pulse Generation（脉冲发生器）	产生规则的脉冲信号

(续)

序号	模块名	主要功能
2	Ramp（斜坡输出）	产生按一定斜率上升或下降的斜坡信号
3	Signal Generation（信号发生器）	产生正弦波、方波、锯齿波和随机信号
4	Band-limited White Noise（白噪声）	产生带宽限制的白噪声
5	Random Number（标准的随机信号）	产生一个标准的、高斯分布的随机信号
6	Sine Wave（正弦波信号）	产生幅值、频率、相位可设置的正弦信号
7	Step（阶跃信号）	产生幅值、起始时间可调的阶跃信号
8	Repeating Sequence（锯齿波发生器）	产生一个时基和高度可调的锯齿波序列
9	Chip Signal（调频信号）	产生频率变化的正弦波信号
10	Uniform Random Number（均匀分布的随机信号）	产生均匀分布的随机信号
11	Clock（时钟）	产生时间信号
12	Digital Clock（数字时钟）	按一定时间间隔，显示时间
13	From Workspace（从工作间输出数据）	从工作间读出数据
14	From File（从 .mat 文件输出数据）	从 .mat 文件读出数据
15	Ground（接地端）	输入接地端
16	In1（分支系统输入端）	分支系统的输入端子

2.2.9 子系统模块库

子系统（Subsystem）模块库包括了许多按条件判断执行的模块，这里就不详细叙述了。

2.3 电力系统模型库

电力系统模型库（Power System Blockset）是专用于 RLC 电路、电力电子电路、电机传动控制系统和电力系统仿真用的模型库。模型库中包含了各种交直流电源、大量电气元器件和电工测量仪表等。利用这些模型可以模拟由电阻、电感、电容组成的电路，含电力电子器件的开关、整流和逆变、变频等装置，以及电力系统运行和故障的各种状态。在电力电子电路和电力拖动控制系统的仿真中将主要使用该模型库的模型。电力系统模型库模块的使用与 SIMULINK 模块的使用不同，电力系统模型库的模块必须连接在回路中使用，因此每个模块都有输入端和输出端，在回路中流动的是电流，并且电流通过每个电气元器件时产生电压降。SIMULINK 模块组成的是信号流程，流入流出模块的信号没有特定的物理含义，其含义要视仿真模型的对象而定。由电力系统模型库模块组成

的电路和系统可以和 SIMULINK 模型库中的控制单元连接、组合成控制系统，研究和观察在不同控制方案下系统的稳态和动态响应，为系统的设计提供依据。电力系统模型库中包含了 7 个子模型库（见图 2-26），其中 Extra Library（其他电气子模型库）还包含了六个二级子模型库（见图 2-27）。以下分别介绍各模型库中的模块及其简要功能。

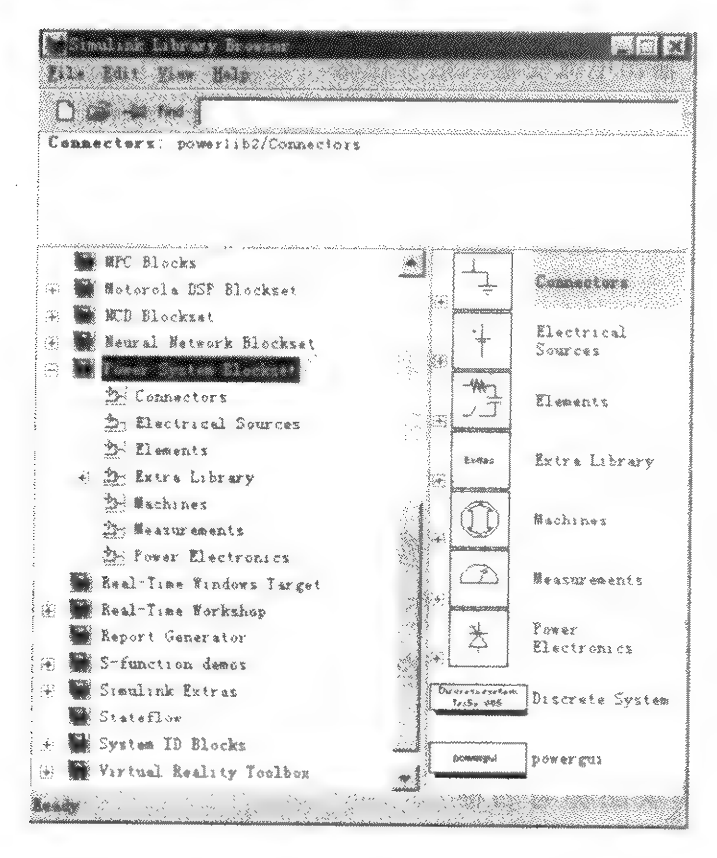


图 2-26　电力系统模型库

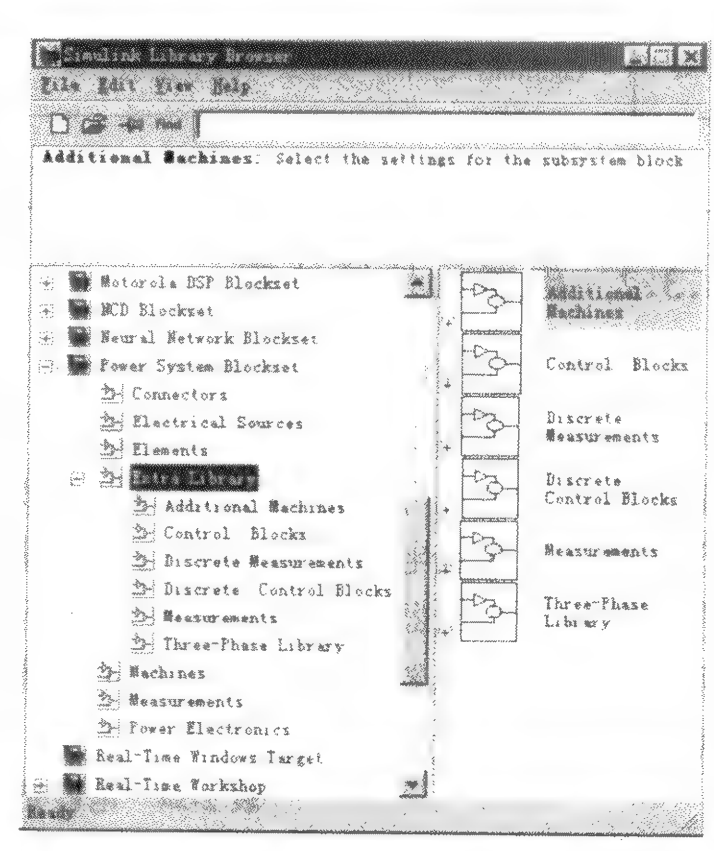


图 2-27　其他电气模型子库集

2.3.1　电源模块库

电源（Electrical Sources）模块库包含了电路和电力系统中使用的交流、直流电源，并且还有两个受控源，受控源输出的电压或电流可以受输入信号的控制。电源模块库中的模块图标与名称及其主要功能见表 2-22 和表 2-23。

表 2-22　电源模块图标与名称

AC Current Source	AC Voltage Source	signal Controlled Current Source	signal Controlled Voltage Source	DC Voltage Source
交流电流源	交流电压源	受控电流源	受控电压源	直流电压源

表 2-23　电源模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	AC Current Source（交流电流源）	提供一个交流电流源

（续）

序号	模 块 名	主要功能
2	AC Voltage Source（交流电压源）	提供一个交流电压源
3	DC Voltage Source（直流电源）	提供一个直流电压源
4	Controlled Current Source 可控电流源	输出电流受输入信号控制
5	Controlled AC Voltage Source 可控电压源	输出电压受输入信号控制

2.3.2 电器元件模块库

电器元件（Elements）模块库包含了各种常用的电器和电路元件的模型，如开关、变压器、电阻、电感和电容等。其中电阻、电感和电容以串联或并联的组合形式给出，可以通过参数的设置得到单个的或者两、三个电阻、电感或电容的组合，并且电阻、电感和电容的串并联模块元件的参数还有两种。变压器有普通线性变压器和带饱和特性的变压器，三相、单相变压器等多种形式模块，可供不同的仿真要求选用。电器元件库中的模块图标与名称及其主要功能分别见表 2-24 和表 2-25。

表 2-24 电器元件模块图标与名称

Breaker		PI Section Line	Linear Transformer	Mutual Inductance
断路器	分布参数传输线	π 型参数传输线	单线性变压器	互感线圈
Saturable Transformer	Parallel RLC Branch	Parallel RLC Load	Series RLC Branch	Series RLC Load
饱和变压器	RLC 并联电路	RLC 并联负载	RLC 串联电路	RLC 串联负载
Surge Arrester	Three-Phase Transformer (Three Windings)		Three - phase Transformer (Two Windings)	
压敏电阻	三绕组三相变压器		二绕组三相变压器	

表 2-25 电器元件模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Breaker(断路器)	模拟空气开关等
2	Distributed Parameters Line(分布参数传输线)	有分布电容、电感的传输导线
3	PI Section Line(π 型参数传输线)	分布电容、电感为 π 型的传输导线
4	Parallel RLC Load (RLC 并联负载)	电阻、电感、电容并联,参数单位为 W(瓦)、Var(乏)
5	Series RLC Load (RLC 串联负载)	电阻、电感、电容串联,参数单位为 W(瓦)、Var(乏)
6	Parallel RLC Branch (RLC 并联电路)	电阻、电感、电容并联,单位为 Ω(欧姆)、H(亨利)、F(法拉)
7	Series RLC Branch (RLC 串联电路)	电阻、电感、电容串联,单位为 Ω(欧姆)、H(亨利)、F(法拉)
8	Linear Transformer(单相线性变压器)	单相变压器,二次侧有一个或两组绕组
9	Saturable Transformer (饱和变压器)	考虑饱和效应的单相变压器
10	Mutual Inductance (互感线圈)	有互感关系的线圈
11	Three-phase Transformer(Three Windings) (三相三绕组变压器)	三相变压器(二次侧有两组绕组)
12	Three-phase Transformer(Two Windings) (三相二绕组变压器)	三相变压器(二次侧有一组绕组)
13	Surge Arrester (压敏电阻)	金属氧化物压敏电阻,过电压保护

2.3.3 电机模块库

电机 (Machines) 模块库提供了 9 种直流电机、交流异步电机和同步电机的模型，电机的参数单位有标幺值单位和标准单位制两种。并且如果电机的负载转矩大于电磁转矩，则电机则工作于发电状态；如果电机的负载转矩小于电磁转矩，则电机则工作于电动状态，所以电机模块既可以用作电动机，也可以作发电机用。电机模型库中还有励磁模块，汽轮机和水轮机的模型，以便组成同步机系统使用。电机模型库中有一个测量单元，测量单元是通用的，用来观测同步机和异步机的运行参数。电机模块图标与名称及其主要功能分别见表 2-26 和表 2-27。

表 2-26　电机模块图标与名称

<table>
<tr><td>Asynchronous Machine pu Units</td><td>Asynchronous Machine SI Units</td><td>DC Machine</td><td colspan="2">Permanent Magnet Synchronous Machine</td></tr>
<tr><td>异步电机
（标幺值单位）</td><td>异步电机
（标准单位）</td><td>直流电机</td><td colspan="2">永磁式同步电机</td></tr>
<tr><td>Simplified Synchronous Machine pu Units</td><td>Simplified Synchronous Machine SI Units</td><td>Synchronous Machine pu Fundamental</td><td colspan="2">Synchronous Machine pu Standard</td></tr>
<tr><td>同步电机
简化模型
（标幺值单位）</td><td>同步电机
简化模型
（标准单位）</td><td>同步电机
基本模型
（标幺值单位）</td><td colspan="2">同步电机
标准模型
（标幺值单位）</td></tr>
<tr><td>Synchronous Machine SI Fundamental</td><td>Excitation System</td><td>Machines Measurement Demux</td><td>HTG</td><td>STG</td></tr>
<tr><td>同步电机
基本模型
（标准单位）</td><td>同步电机
励磁系统</td><td>电机测量单元</td><td>水轮机和
调节器</td><td>汽轮机和
调节器</td></tr>
</table>

表 2-27　电机模块主要功能

<table>
<tr><th>序号</th><th>模 块 名</th><th>主要功能</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Asynchronous Machine pu. Unite
（异步电机）标幺值单位</td><td rowspan="2">交流异步电机模型，可以有绕线转子和笼型两种转子形式，参数有标幺值和标准化两种单位</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Asynchronous Machine SI Unite
（异步电机）标准单位</td></tr>
<tr><td>3</td><td>DC Machine
（直流电机）</td><td>直流电机模型，可以用作电动机或发电机</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Peranent Magnet Synchronous Machine
（永磁式同步电机）</td><td>交流同步电机，转子为永磁体</td></tr>
</table>

（续）

序号	模块名	主要功能
5	Simplified Synchronous Machine pu. Unite（同步电机简单模型）标幺值单位	交流同步电机的五种模型，模型的复杂程度不同，对模型参数要求不同，并且有标幺值和标准制两种单位
6	Simplified Synchronous Machine SI Unite（同步电机简化模型）标准单位	
7	Synchronous Machine pu. Fundamental（同步电机基本模型）标幺值单位	
8	Synchronous Machine pu Standard（同步电机标准型）标幺值单位	
9	Synchronous Machine SI Fundamental（同步电机基本模型）标准单位	
10	Excitation System（同步电机励磁系统）	为交流同步机提供励磁控制的模块
11	Machines Measurement Demax（电机测量单元）	同步机和异步机通用的测量模块，将电机测量端以矢量形式输出的多个运行参数分解为独立的参数
12	HTG（水轮机和调节器）	和同步发电机配套的水轮机模型
13	STG（汽轮机和调节器）	和同步发电机配套的汽轮机和调节器模型

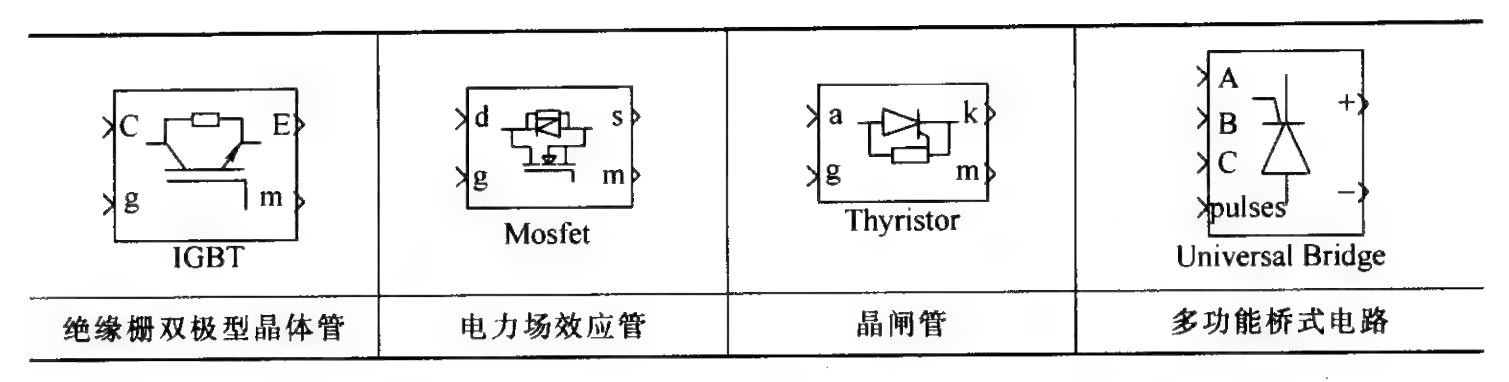
2.3.4 电力电子元件模块库

电力电子元件（Power Electronics）模块库包含了常用的晶闸管、可关断晶闸管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管等模型，还有一个多功能桥模块。电力电子元件模块图标与名称及其主要功能见表 2-28 和表 2-29。

表 2-28　电力电子元件模块图标与名称

Detailed Thyristor	Diode	Gto	Ideal Switch
详细的晶闸管模型	二极管	可关断晶闸管	理想开关

（续）



绝缘栅双极型晶体管	电力场效应管	晶闸管	多功能桥式电路

表 2-29　电力电子元件模块主要功能

序号	模 块 名	主要功能
1	Detailed Thyristor（详细的晶闸管模型）	对参数要求不同的两种晶闸管模型
2	Thyristor（晶闸管）	
3	Gto（可关断晶闸管）	门极可关断的晶闸管
4	Ideal Switch（理想开关）	一种通断可控制的开关
5	IGBT（绝缘栅双极型晶体管）	绝缘栅双极型晶体管，简称 IGBT
6	Mosfet（电力场效应晶体管）	电力场效应晶体管的通用模型，不分 P 沟道和 N 沟道
7	Diode（二极管）	普通二极管模型
8	Universal Bridge（多功能桥式电路）	多功能桥可以设置为单相和三相，可以选择不同的电力电子器件，并且可以用作整流器或逆变器

2.3.5　连接件模块库

电力系统模型库中的模块连接有特殊要求，例如两个模块的输出端不能直接相连，需要使用连接件才能进行连接，连接件（Connectors）模块库则提供了组织电力电子仿真线路的各种连接件。连接件模块图标与名称见表 2-30，模块的主要功能见表 2-31。

表 2-30　连接件模块图标与名称

Bus Bar (thin horiz) Bus Bar (horiz)	Bus Bar (thin vert) Bus Bar (vert)	Ground (input) Ground (output)	Neutral (input) Neutral (output)	L connector T connector
水平公共母线（细型、粗型）	垂直公共母线（细型、粗型）	接地端（输入、输出）	等电位接点（输入、输出）	L 型接点 T 型接点

表 2-31 连接件模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	Bus Bar（母线）	母线也称汇流排，其输入和输出的端点数可以设置
2	Ground（接地端）	接地端点
3	Neutral（等电位接点）	该接点可以编号，相同编号的接点是连接在一起的，有相同的电位
4	L connector（L 型接点）	连接两个模块的输出端
5	T connector（T 型接点）	有两个输入和一个输出，用于连接两个模块的输出端，并输出

2.3.6 测量仪器模块库

测量仪器（Measurements）模块库中的模块用于电压、电流和阻抗的测量。测量仪器模块图标与名称及其主要功能见表 2-32 和表 2-33。

表 2-32 测量仪器模块图标与名称

Current Measurement	Voltage Measurement	Multimeter	Impedance Measurement
电流测量模块	电压测量模块	多路测量仪	阻抗测量

表 2-33 测量仪器模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	Current Measurement（电流测量）	用于检测电流，使用时串联在被测电路中，相当于电流表的检测棒，其输出端“i”则输出电流信号
2	Voltage Measurement（电压测量）	用于检测电压，使用时并联在被测电路中，相当于电压表的检测棒，其输出端“v”则输出电压信号
3	Multmeter（多路测量仪）	如果 Power System 模块的参数对话框中带有测量的选项，如电源模块的测量选项有电压、电流或电压电流的三种选择，如果选择了选项，则多路测量仪可以接收到该模块的电压、电流或电压电流信号并输出
4	Impedance（阻抗测量）	用于测量一个电路某两点之间的阻抗

2.3.7 其他电气模块库

其他电气模块库（Extra Library）收入了没有包括在上述的6个模型库中的其他电气元器件模型，使用这些模型可以使电力系统仿真的功能更丰富。其他电气模块库又包含了6个子库集，这6个子库的名称与内容见表2-34。下面主要介绍其他电气模块库中连续系统仿真的子模块，而离散化模块的功能与其相对应的连续系统模块的功能是基本相同的。

表2-34 其他电气模型库子库名称与内容

子库名称	子库内容
Additional Machines	提供了2个直流电机模块，其中1个是离散化的
Control Blocks	控制模块，提供了6种驱动模块
Discrete Measurements	提供了13种离散化的测量模块
Discrete Control Blocks	提供了15种离散化的控制模块
Measurements	提供了8种测量模块
Three-Phase Library	提供了18种三相元器件模块

2.3.7.1 控制模块子集

控制模块（Control Blocks）子集中包含了6种驱动模块和信号模块。控制模块子集中的模块图标与名称及其主要功能见表2-35和表2-36。

表2-35 控制模块子集中的模块图标与名称

alpha_deg A B C Block PY PD Synchronized 12-Pulse Generator	abc 3-phase Programmable Source	Signal(s) Pulses PWM Generator	alpha_deg AB BC CA Block pulses Synchronized 6-Pulse Generator	Timer	Timer OLD
同步12脉冲发生器	三相程序电源	PWM发生器	同步6脉冲发生器	定时逻辑信号发生器	可控信号发生器

表2-36 控制模块子集中的模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	Synchronized 12-Pulse Generator（同步12脉冲发生器）	用于产生12相晶闸管整流电路（双三相桥）的触发脉冲
2	3-Phase Programmable（三相可编程电源）	三相可编程电源可以使输出的电压和电流的幅值，相位、频率在设定的时间发生变化，并且可以在基波的基础上叠加谐波

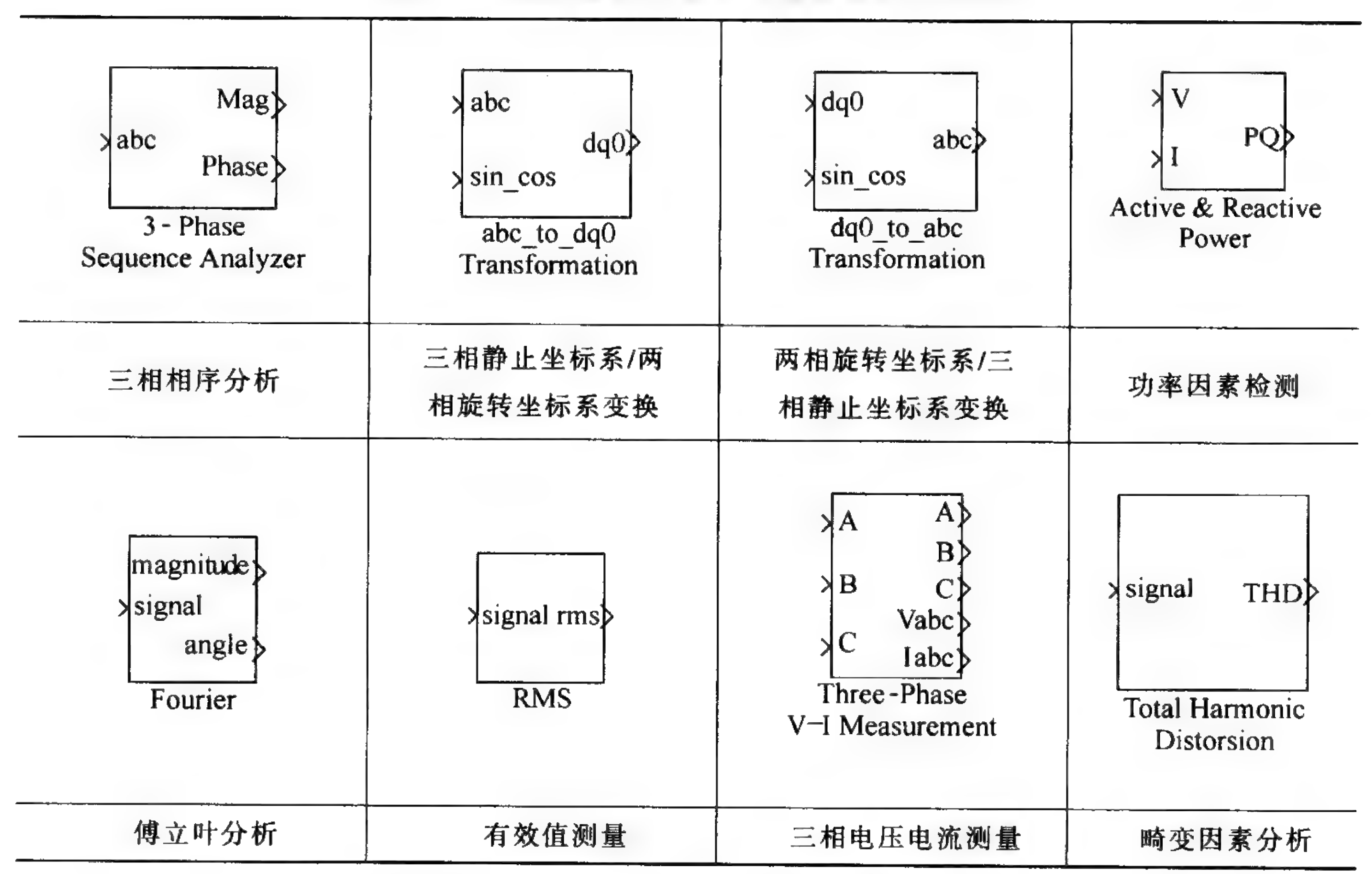
（续）

序号	模块名	主要功能
3	PWM Generator（PWM 驱动信号发生器）	产生三相 PWM 驱动信号，其调制信号有内部产生和外部输入两种，使用内部产生，则为 SPWM 调制方式
4	Synchronized 6-Phase Generator（同步 6 脉冲发生器）	用于产生三相晶闸管桥式整流电路（全控型）的触发脉冲
5	Times（可编程阶跃信号）	在设定的时间上，使输出发生阶跃变化（0 或 1），常用于理想开关和断路器的控制
6	Times OLD	基本与 Times 模块相同

2.3.7.2 测量模块子集

测量模块（Measurements）子集是对测量仪器库模块的扩充。测量模块子集模块中的模块图标与名称及其主要功能见表 2-37 和表 2-38。

表 2-37 测量模块子集中的模块图标与名称



3 - Phase Sequence Analyzer	abc_to_dq0 Transformation	dq0_to_abc Transformation	Active & Reactive Power
三相相序分析	三相静止坐标系/两相旋转坐标系变换	两相旋转坐标系/三相静止坐标系变换	功率因素检测
Fourier	RMS	Three-Phase V-I Measurement	Total Harmonic Distorsion
傅立叶分析	有效值测量	三相电压电流测量	畸变因素分析

表 2-38 测量模块子集中的模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	3-Phase Sequence Analyzer（三相相序分析）	分析三相输入电压的正序、负序或零序分量的幅值和相位，输入可以是平衡的三相电压或不平衡的三相电压，甚至可以是带有谐波的

（续）

序号	模块名	主要功能
2	abc_to_dq0 Transformation（abc坐标系/dq0坐标系变换）	三相静止坐标系/两相旋转坐标系变换
3	dq0_to_abc Transformation（dq0坐标系/abc坐标系变换）	两相旋转坐标系/三相静止坐标系变换
4	Active & Reactive Power（有功功率和无功功率测量）	根据输入的电压和电流（瞬时值）计算其中有功和无功分量
5	Fourier（傅里叶分析）	对输入信号作傅里叶分析，可分析指定次谐波的幅值和相位
6	RMS（有效值测量）	测量电压或电流的有效值
7	Three-Phase V-I Measurement（三相电路电压电流测量）	将模块串联在三相电路中，可以测量电路的三相电压和电流，并有两种单位制选择
8	Total Harmonic（畸变因素分析）	分析输入电压或电流信号的畸变因素

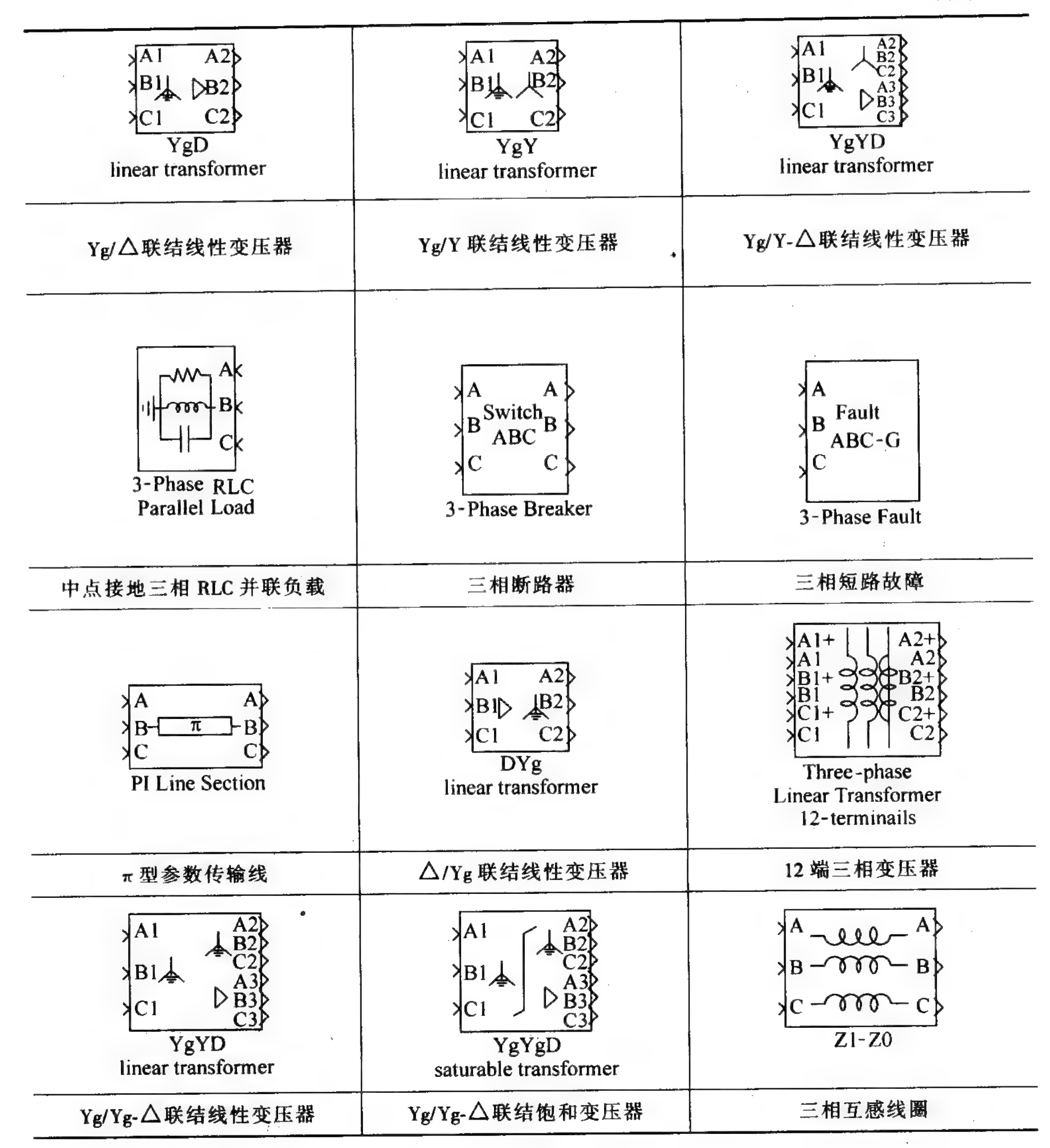
2.3.7.3 三相模型子集

三相模型（Three-phase Library）子集的模块主要使用在三相电路中，其中包括了三相电阻、电感、电容、三相断路器和各种三相变压器的模块，该子集中的模块图标与名称及其功能见表2-39和表2-40。

表2-39 三相模型子集中的模块图标与名称

3-phase Parallel RLC	3-Phase RLC Series Load	3-Phase Series RLC
三相RLC并联电路	中点接地三相RLC串联负载	三相RLC串联电路
6-Pulse diode bridge	6-pulse thyristor bridge	inductive source with neutral
三相桥式二极管整流器	三相桥式晶闸管整流器	带中点的三相电源

（续）



YgD linear transformer	YgY linear transformer	YgYD linear transformer
Yg/△联结线性变压器	Yg/Y 联结线性变压器	Yg/Y-△联结线性变压器
3-Phase RLC Parallel Load	3-Phase Breaker	3-Phase Fault
中点接地三相 RLC 并联负载	三相断路器	三相短路故障
PI Line Section	DYg linear transformer	Three-phase Linear Transformer 12-terminails
π 型参数传输线	△/Yg 联结线性变压器	12 端三相变压器
YgYD linear transformer	YgYgD saturable transformer	Z1-Z0
Yg/Yg-△联结线性变压器	Yg/Yg-△联结饱和变压器	三相互感线圈

表 2-40　三相模型子集中的模块主要功能

序号	模块名	主要功能
1	3-Phase Parallel RLC（三相 RLC 并联电路）	三相对称的 RLC 并联电路
2	3-Phase Series RLC（三相 RLC 串联电路）	三相对称的 RLC 串联电路

（续）

序号	模块名	主要功能
3	3-Phase RLC Series Load（三相RLC串联负载）	中点接地的三相对称RLC串联负载
4	3-Phase RLC Parallel Load（三相RLC并联负载）	中点接地的三相对称RLC并联负载
5	3-Phase Breaker（三相断路器）	三相断路器
6	3-Phase Fault（三相短路故障）	可以模拟三相短路故障
7	6-Pulse Diode Bridge（三相桥式二极管整流器）	即三相桥式不控整流器
8	6-Pulse Thyristor Bridge（三相桥式晶闸管整流器）	三相桥式晶闸管元件整流器
9	Inductive Source with neutral（带中点的三相电源）	有中点的三相电源，并且可以设定电源的内阻抗
10	PI Line Section（π型参数传输线）	三相有π型参数结构的传输线
11	DYg Linear Transformer（△/Yg联结线性变压器）	二次侧中点接地的△/Y联结线性三相变压器
12	YgD Linear Transformer（Yg/△联结线性变压器）	一次侧中点接地的三相Y/△联结线性变压器
13	YgY Linear Transformer（Yg/Y联结线性变压器）	一次侧中点接地的三相Y/Y联结线性变压器
14	YgYD Linear Transformer（Yg/Y-△联结线性变压器）	一次侧中点接地的三相Y/Y-△联结线性变压器
15	YgYgD Linear Transformer（Yg/Y-△联结线性变压器）	一、二次侧中点接地的三相Y/Y-△联结线性变压器
16	YgYgD Saturable Transformer（Yg/Yg-△饱和变压器）	一、二次侧中点接地的三相Y/Y-△联结饱和特性变压器
17	Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals（12端三相变压器）	绕组分离的三相线性变压器（有12端子），可以任意连接
18	Z1-Z0（三相互感线圈）	三个有互感的线圈

第3章 电力电子器件模型

MATLAB/SIMULINK/Power System Blockset 模型库中包含了常用的电力电子器件模型和整流、逆变电路模块以及相应的驱动模块，使用这些模块构建和编辑电力电子电路并仿真是很方便的。MATLAB 电力电子器件模型使用的是简化的宏模型，它只要求器件的外特性与实际器件特性基本相符，而没有考虑器件内部的细微结构，属于系统级模型。这与 PSPICE 软件的电子元器件模型不同，PSPICE 的元件模型更详细、复杂，是器件级模型，用 PSPICE 仿真可以细致地反映元器件工作情况。虽然 MATLAB 的电力电子器件模型较为简单，但是它开销的系统资源较少，用于电力电子电路和系统仿真时，出现仿真不收敛的几率较小，这是它的特点。

开关特性是电力电子器件的主要特性，MATLAB 电力电子器件模型主要仿真了电力电子器件的开关特性，并且不同电力电子器件模型都具有类似的模型结构（见图 3-1）。模型主要由可控开关 SW、电阻 Ron、电感 Lon、直流电压源 Vf 的串联电路和开关逻辑单元组成，不同电力电子器件的区别在开关逻辑不同，开关逻辑决定了各种器件的开关特征。模型中的电阻 Ron 和直流电压源 Vf 分别用来反映电力电子器件的导通电阻和导通时的门槛电压。串联电感限制了器件开关过程中的电流升降速度，模拟器件导通或关断时的变化过程。MATLAB 的电力电子器件模型一般都没有考虑器件关断时的漏电流，在这方面，不如 SPICE 模型细致。

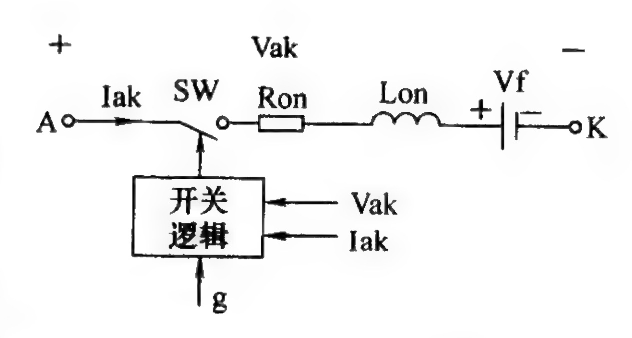


图 3-1 电力电子器件模型

MATLAB 的电力电子器件必须连接在电路中使用，也就是要有电流的回路，但是器件的驱动仅仅是取决于门极信号的有无，没有电压型和电流型驱动的区别，也不需要形成驱动的回路，这是 MATLAB 电力电子器件模型与其他 SPICE 模型的不同之处。尽管模型与实际器件工作有差异，但是也使 MATLAB 电力电子器件模型在与控制连接的时候很方便。

电力电子器件在使用时一般都并联有缓冲电路，因此，在 MATLAB 电力电子器件模型中也已经并联了简单的 RC 串联缓冲电路，缓冲电路的 RC 值可以在参数表中设置，更复杂的缓冲电路则需要另外建立。有的器件（如 MOSFET）模型还反并联了二极管，在使用中要注意。

MATLAB 的电力电子器件模型中含有电感，因此有电流源的性质，在没有连接缓冲电路时不能直接与电感或电流源相连接，也不能开路工作。含电力电子模型的电路或系统仿真时，仿真算法一般采用刚性积分算法，如 ode23tb、ode15s，这样可以得到较快的仿真速度。

电力电子器件的模块上，一般都带有一个测量输出端 m，通过输出端 m 可以观测器件的电压和电流，不仅测量方便，并且可以为选择器件的耐压和电流提供依据。

3.1 二极管模型

二极管是不控的单向导电型二端半导体器件，二极管图标如图 3-2 所示，二极管模型如图 3-3 所示。模型二极管的单向导电性能由二极管逻辑控制，当二极管承受正向电压时（Vak > 0）二极管导通，当二极管电流下降到零（Iak = 0）或承受反向电压时（Vak ≤ 0），二极管关断。二极管模型的伏安特性如图 3-4 所示。二极管模型的参数见表 3-1。

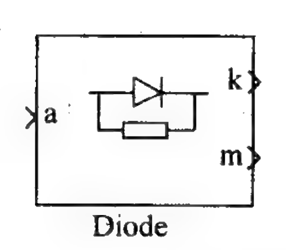


图 3-2 二极管图标

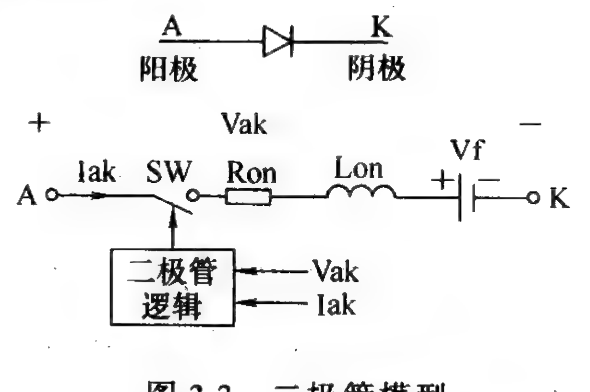


图 3-3 二极管模型

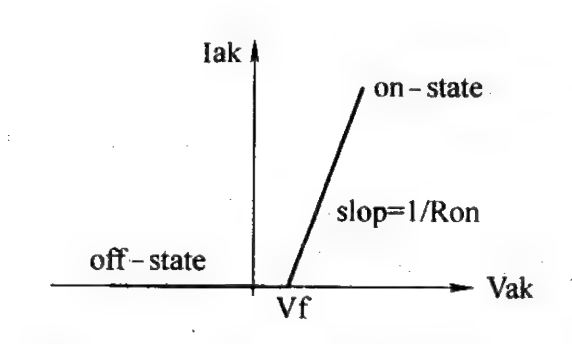


图 3-4 二极管模型的伏安特性

表 3-1 二极管模型的参数

二极管参数	单位
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）
电 感 Lon	H（亨利）
门槛电压 Vf	V（伏特）
初始电流 Ic	A（安培）
缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）
缓冲电容 Cs	F（法拉）

在二极管参数设置中，当电感参数为“0”时，电阻不能同时取“0”，当电阻参数取“0”时，电感参数也不能同时取“0”。在设置了门槛电压 Vf 时，只有当二极管正向电压大于 Vf 后，二极管才能导通。在参数对话框还有初始电流一

栏，设置初始电流可以使电路在非零状态下开始仿真，但是初始电流设置是有条件的，首先是在二极管电感参数大于“0”时才能设定这项参数，其次是仿真电路的其他储能元件也设定了初始值，尤其是设定所有其他相关储能元件的初始值是很麻烦的，所以一般都取初始电流为“0”，使电路在零状态下开始仿真。

模型二极管已并联有 RC 缓冲电路，在缓冲电阻值设为“inf”，缓冲电容设为“0”时，则二极管取消了缓冲电路部分。如果在缓冲电阻不为“0”时，设缓冲电容为“inf”，则是纯电阻的缓冲电路。

MATLAB 的二极管模型没有普通二极管、电力二极管、快恢复二极管等的区分，统一的是一个模型，不同的二极管只能在参数设置上略有差异。

3.2 晶闸管模型

晶闸管是可控整流电路常用的整流器件，在模型库中晶闸管模型有两种，一种是较详细的模型，其模型名为 detailed thyristor，可设置参数较多；另一种是简化的模型，模型名为 thyristor，参数设置较简单。晶闸管图标如图 3-5 所示，晶闸管的模型及其伏安特性分别如图 3-6 和图 3-7 所示。双击模型图标则弹出模型参数的对话框，在对话框中可以设置的晶闸管模型参数见表 3-2。

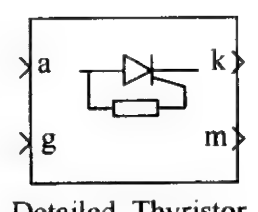


图 3-5　晶闸管图标

表 3-2　晶闸管模型参数

晶闸管参数名	单　位	备　注
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）	
内部电感 Lon	H（亨利）	
门槛电压 Vf	V（伏特）	
初始电流 Ic	A（安培）	
擎住电流 I_l	A（安培）	简单模型没有
关断时间 Tq	s（秒）	简单模型没有
缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）	
缓冲电容 Cs	F（法拉）	

晶闸管模型在晶闸管承受正向电压（$Vak > 0$），且门极有正的触发脉冲信号（$g > 0$）时晶闸管导通。触发脉冲的宽度要使阳极电流 Iak 能大于设定的晶闸管擎住电流 I_l，晶闸管才能正常导通，否则在导通过程中，如果在阳极电流还小于擎住电流时，门极信号已经为零（$g = 0$），则晶闸管仍要转向关断。

导通的晶闸管在阳极电流下降到零($Iak = 0$)，或者晶闸管承受反向电压时晶闸管关断，但是晶闸管承受反向电压的时间应大于设置的关断时间 Tq，否则，

尽管门极信号为零，晶闸管还可能导通，因为关断时间是表示晶闸管内载流子复合的时间，是晶闸管阳极电流减少为零后到晶闸管能再次施加正向电压而不会误导通的一段时间间隔。

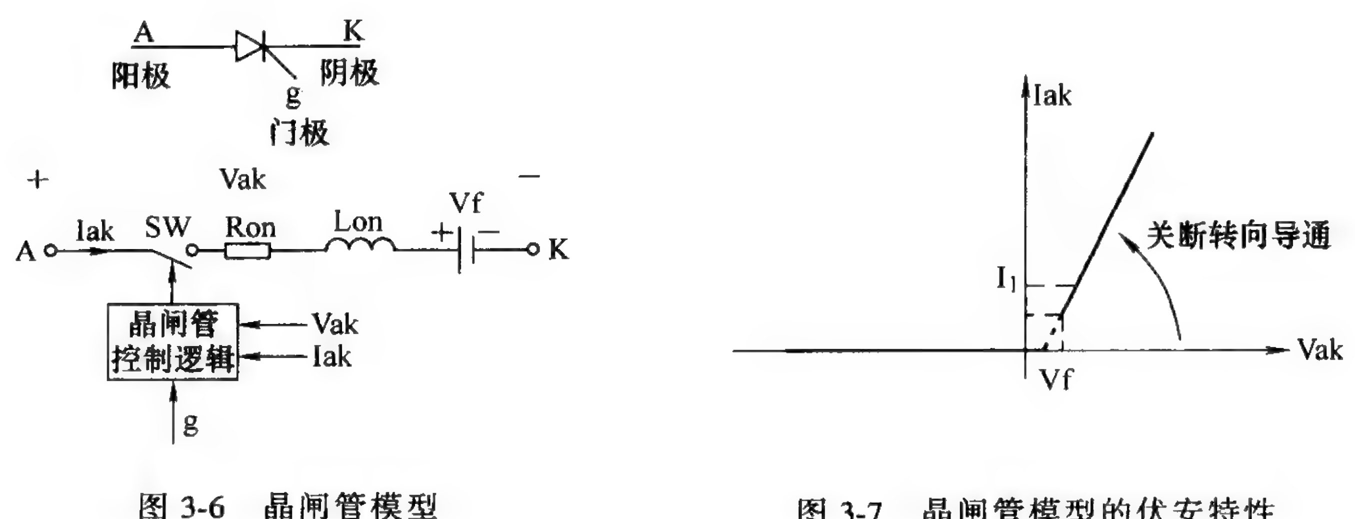


图 3-6　晶闸管模型　　　　图 3-7　晶闸管模型的伏安特性

晶闸管模型的导通和关断与实际的物理晶闸管有差别，一是只要门极信号大于零，同时满足正向电压条件晶闸管就能导通；二是阳极电流下降到零(Iak = 0）后晶闸管才能关断，而不是阳极电流下降到维持电流以下晶闸管就关断。

晶闸管的简单模型没有擎住电流和关断时间这两项参数，因此在较复杂的电路仿真中使用较为方便。关于初始电流、缓冲电阻和缓冲电容的设置要求与二极管相同。

含晶闸管模型的电路仿真，仿真算法宜采用 Ode23tb 或 Ode15s。

3.3　可关断晶闸管模型

可关断晶闸管（GTO）与普通晶闸管的区别是，可以通过门极信号在任何时间使导通的晶闸管关断。但是 MATLAB 的可关断晶闸管模型，在导通和关断的控制要求上与实际的可关断晶闸管有较大不同，可关断晶闸管模型在管子承受正向电压，且门极信号大于零（g > 0）时导通，在门极信号等于零（g = 0）时关断。实际的物理可关断晶闸管在一旦导通后，门极信号可以为零，管子仍保持导通状态，而关断时，需要在门极有足够的反抽电流才能关断。模型的关断过程分为两段，一段是下降时间 Tf，一段是电流的拖尾时间 Tt。在电流的下降时间内电流减小到关断时电流的 10%，再经过一段拖尾时间，电流才下降为零，电流的下降时间和拖尾时间可以在参数中设置。可关断晶闸管图标如图 3-8 所示，可关断晶闸管的模型和开关特性分别如图 3-9 和图 3-10 所示，模型的参数见表 3-3。

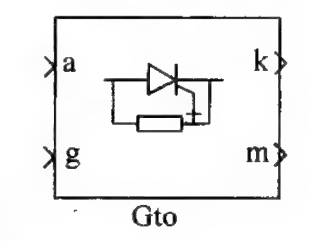


图 3-8　可关断晶闸管图标

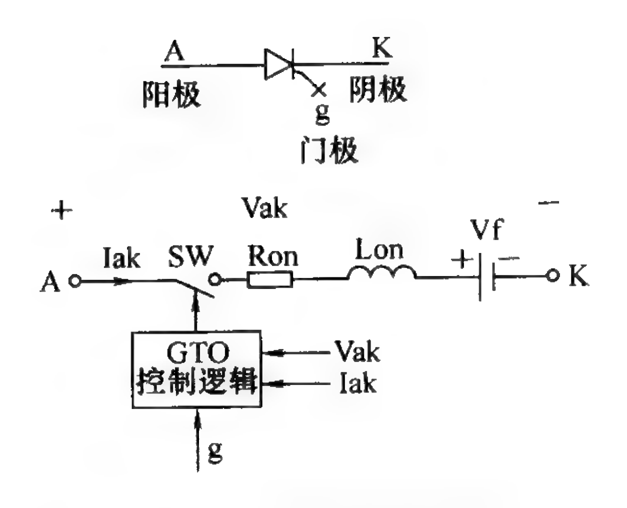



图 3-9 可关断晶闸管模型

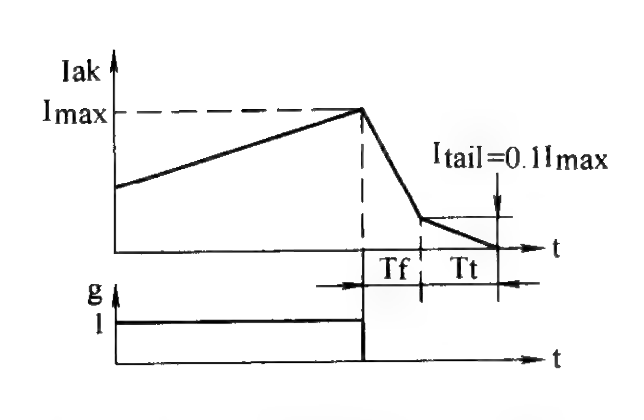


图 3-10 可关断晶闸管开关特性

表 3-3 可关断晶闸管模型参数

可关断晶闸管参数名	单 位
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）
内部电感 Lon	H（亨利）
电流下降时间 Tf	s（秒）
电流拖尾时间 Tt	s（秒）
初始电流 Ic	A（安培）
缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）
缓冲电容 Cs	F（法拉）

可关断晶闸管模型也已经并联了 RC 缓冲电路，缓冲电路的设置与二极管模型相同。带可关断晶闸管模型的电路仿真，仿真算法同样宜采用 Ode23tb 或 Ode15s。

3.4 电力场效应晶体管模型

电力场效应晶体管具有开关频率高，导通压降小等特点，在电力电子电路中使用广泛。场效应晶体管一般有结型和绝缘栅型两种，MATLAB 的场效应晶体管模型其实并不区分这两种模型，也没有 P 沟道和 N 沟道之分，它仅仅反映了场效应晶体管的开关特性，是场效应晶体管通用的宏模型。电力场效应晶体管模型及其外特性如图 3-12 和图 3-13 所示，模型的参数见表 3-4。

图 3-11 电力场效应晶体管图标

场效应晶体管模型在门极信号为正（$g>0$），且漏极电流大于 0 时导通，在门极信号为零时关断。场效应晶体管模型上反并联了一个二极管，因此在外特性上，正向导通状态的导通电阻是 Ron，而外特性中的反向

导通是二极管导通，导通电阻是二极管的电阻 Rd。

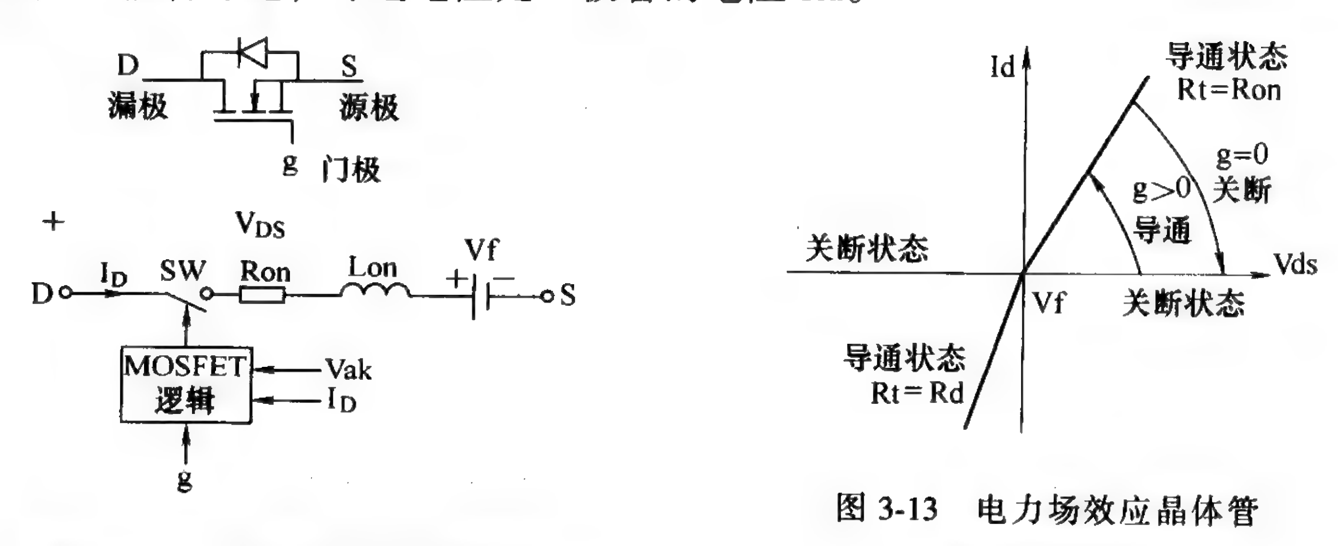


图 3-12　电力场效应晶体管模型

图 3-13　电力场效应晶体管模型的外特性

表 3-4　电力场效应晶体管模型参数

参　　数	单　　位
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）
导通电感 Lon	H（亨利）
内接二极管电阻 Rd	Ω（欧姆）
初始电流 Ic	A（安培）
缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）
缓冲电容 Cs	F（法拉）

参数中的缓冲电阻和缓冲电容的参数设置与二极管相同。

3.5　绝缘栅双极型晶体管模型

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）结合了场效应晶体管和电力晶体管的优点，具有驱动功率小，开关速度快，通流能力强的特点，目前已经成为中小功率电力电子设备的主导器件。绝缘栅双极型晶体管图标如图 3-14 所示。绝缘栅双极型晶体管模型及其外特性如图 3-15 和图 3-16 所示。模型参数见表 3-5。

IGBT 模型在集射极间电压为正（Vce > 0），且有门极信号（g > 0）时导通；即使集射极间电压为正（Vce > 0），但是门极信号为零（g = 0），IGBT 也要关断。如果 IGBT 集射极间电压为负（Vce < 0），则管子处在关断状态，但对于商品 IGBT 来说，因为其内部已并联了反向二极管，所以在 IGBT 集射极间电压为负时也反向导通。

IGBT 模型的开关特性如图 3-17 所示。IGBT 在关断时，有电流下降和电流拖尾两端时间，在下降时间内电流减小到关断前的 10%，再经过一段电流的拖尾

时间，IGBT 才完全关断。IGBT 的电流下降时间和拖尾时间可以在参数对话框中设置。

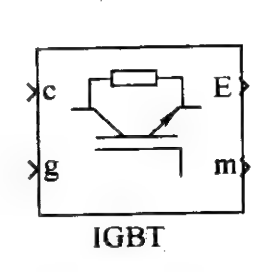


图 3-14　绝缘栅双极型晶体管图标

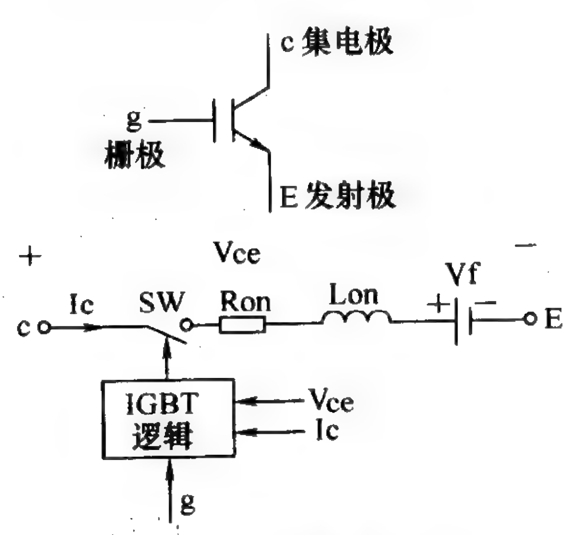


图 3-15　绝缘栅双极型晶体管模型

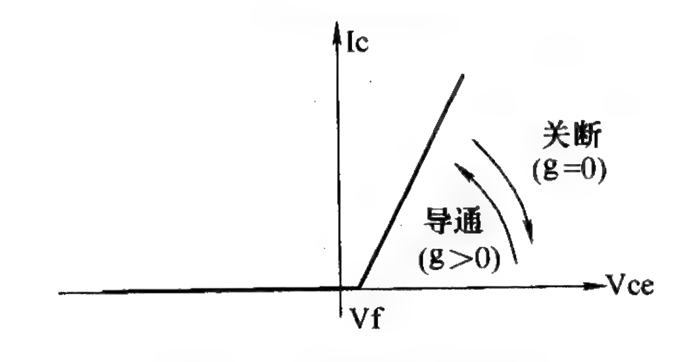


图 3-16　绝缘栅双极型晶体管模型的外特性

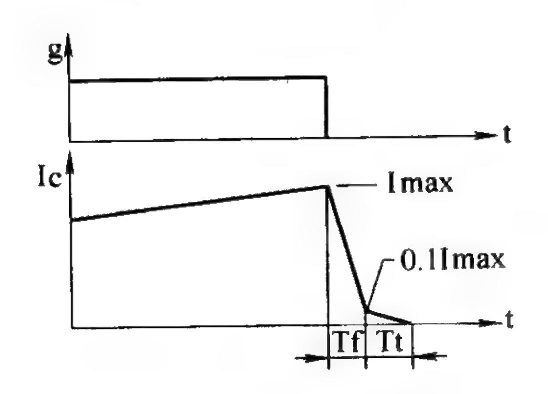


图 3-17　绝缘栅双极型晶体管模型的开关特性

表 3-5　绝缘栅双极型晶体管模型参数

参　　数	单　　位
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）
导通电感 Lon	H（亨利）
门槛电压 Vf	V（伏特）
电流下降时间 Tf	s（秒）
电流拖尾时间 Tt	s（秒）
初始电流 Ic	A（安培）
缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）
缓冲电容 Cs	F（法拉）

IGBT 模型也已经连接了 RC 缓冲电路，缓冲电阻和电容的设置与其他器件相同。

3.6 理想开关模型

理想开关是 MATLAB 特设的一种电子开关。理想开关图标如图 3-18 所示。理想开关的特点是开关受门极控制，开关导通时电流可以双向通过。理想开关的模型比较简单（见图 3-19），它仅由开关 SW 和电阻 Ron 组成，SW 由开关逻辑控制。当门极信号 $g = 0$ 时，无论开关受正向还是反向电压，开关都关断；当门极信号 $g > 0$ 时，无论开关受正向还是反向电压，开关都导通。在门极触发时开关动作是瞬时完成的。理想开关模型的伏安特性如图 3-20 所示。理想开关模型参数的设置见表 3-6。其初始状态一栏，如果起动仿真时开关应是接通状态，则设为“0”；如果启动仿真时开关应是断开的，则设为“1”。缓冲电阻和电容的设置与前面相同。

1 2 g m

Ideal Switch

图 3-18 理想开关图标

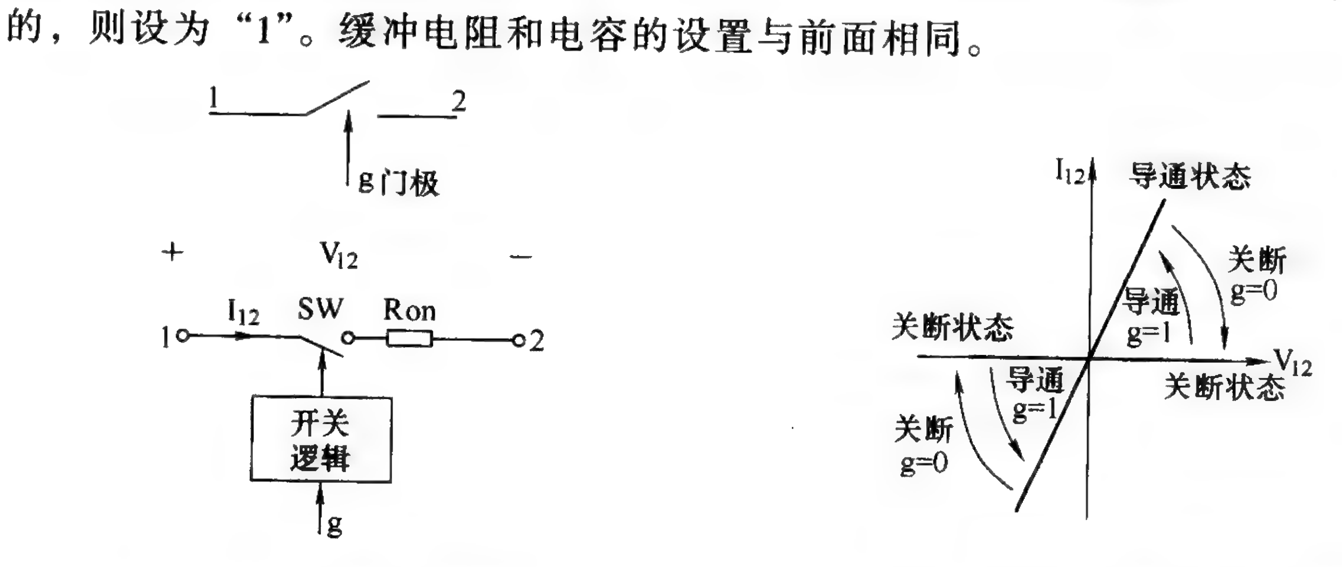


图 3-19 理想开关模型

图 3-20 理想开关模型的伏安特性

理想开关在仿真中可以作为断路器使用，设计适当的门极驱动，也可以作为简单的半导体开关如 GTO、MOSFET 等用于电流斩波控制。

表 3-6 理想开关模型参数

理想开关参数	单 位
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）
初始状态	导通为“0”，关断为“1”
缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）
缓冲电容 Cs	F（法拉）

3.7 三相桥式整流电路模型

三相桥式整流电路是最常用的整流电路，MATLAB 模型库提供了不控和可控

两种三相桥式整流电路模型。

3.7.1 三相桥式不可控整流电路模型

表 3-7 三相桥式不控整流电路模型参数

参 数	单 位
二极管通态电阻	Ω（欧姆）
二极管通态电感	H（亨利）
二极管门槛电压	V（伏特）
缓冲电阻	Ω（欧姆）
缓冲电容	F（法拉）

三相桥式不控整流电路由六个二极管按桥式连接组成（见图 3-21）。它有三个输入端，分别是 A、B、C，用于连接三相电源或整流变压器的三相输出；它的两个输出端 K 和 A，则输出整流后的直流电压，其中 K 端为“+”，A 端为“-”。模型参数见表 3-7。不控整流电路模型实际设置的是二极管参数，其中 RC 缓冲电路的设置也与二极管相同。

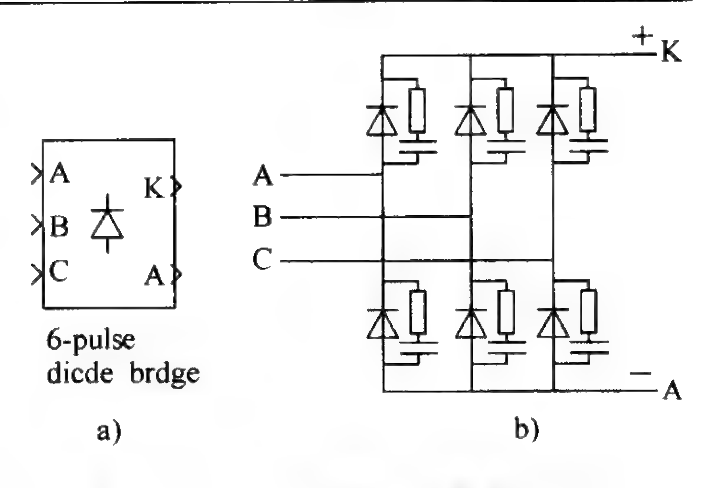


图 3-21 三相不控桥式整流电路
a）图标 b）电路

3.7.2 三相桥式可控整流电路模型

三相桥式可控整流电路由六个晶闸管作桥式连接而成，其图标和电路如图 3-22 所示。使用时，模块的 A、B、C 三个输入端连接三相电源或三相变压器的二次侧；它的两个输出端 K 和 A，则输出整流后的直流电压，其中 K 端为“+”，A 端为“-”。模型的脉冲输入端 pulse 用于接入晶闸管的触发信号，三相桥式可控整流电路模型有专用的触发模块，这在驱动模块一节中介绍。

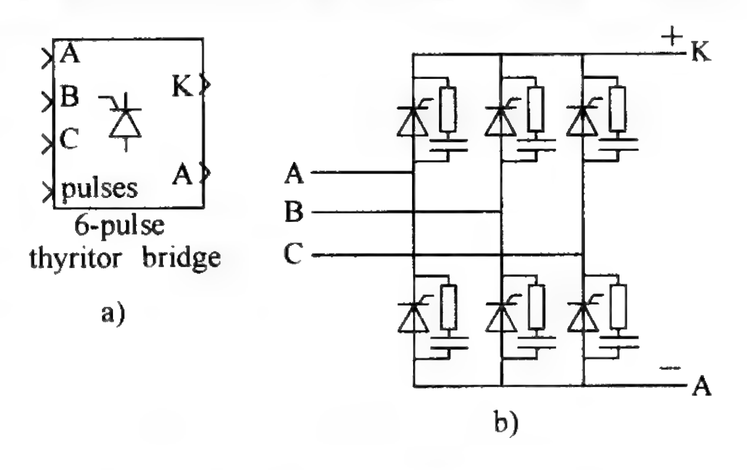


图 3-22 三相桥式整流电路
a）图标 b）电路

三相桥式可控整流电路模型是由六个单个晶闸管模块连接的分支电路（见图 3-23a），模型上没有留出测量的端口，在分支电路中已经将晶闸管的测量端封闭，这在需要观察晶闸管的电压和电流时不方便。为了便于观测晶闸管的电压和电流可以对模型略作修改，方法

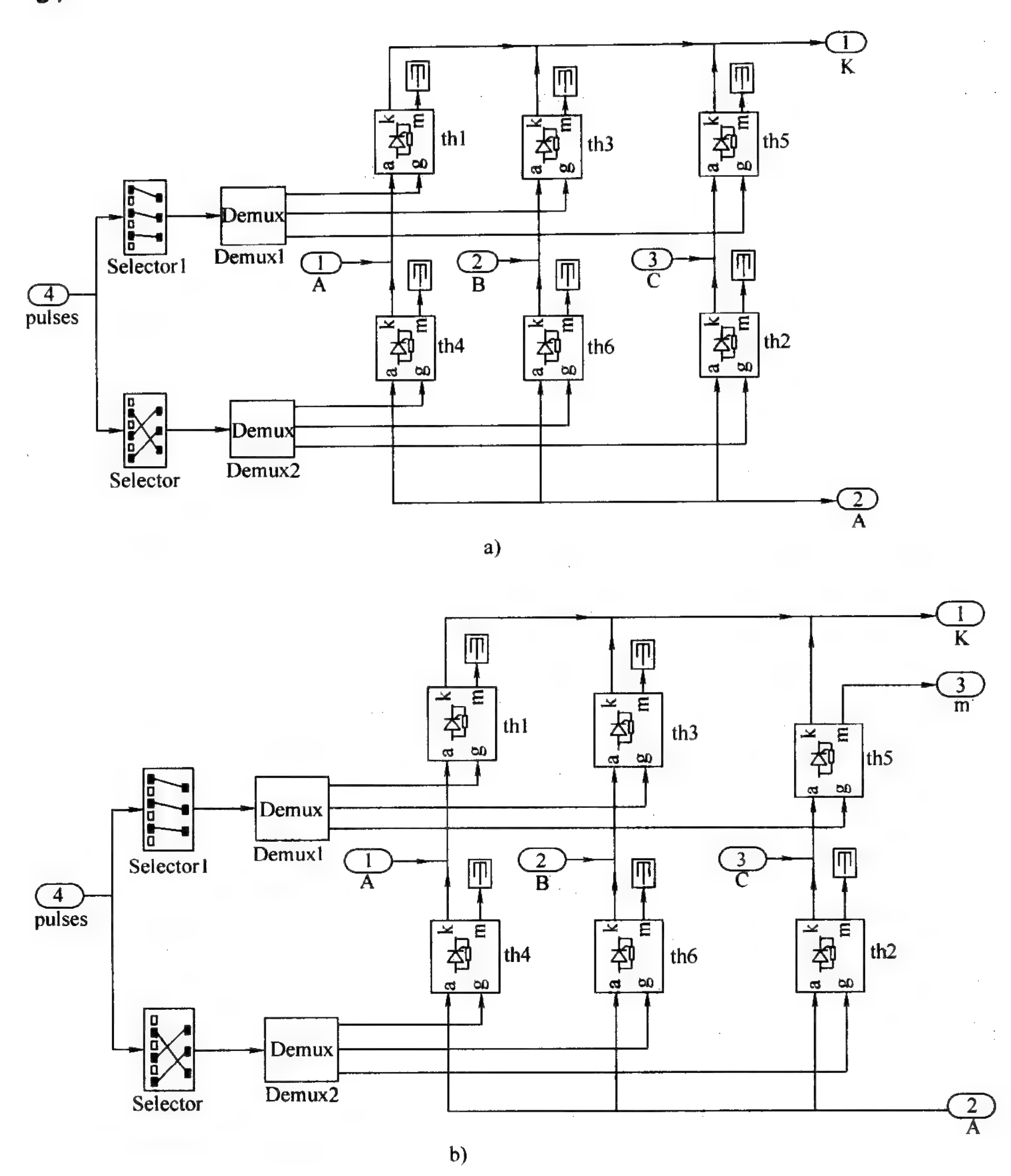


图 3-23　三相桥式整流模块分支模型

a）三相桥式整流电路模型　b）增加检测端的三相桥式整流电路模型

如下：点击选中可控整流模块，在菜单栏 Edit 下选中 Look under mask，则可调出如图 3-23a 所示的整流电路模型，如要观测某一晶闸管的电流电压，则将该晶闸管模型测量端的山字型封口删除，换接上分支电路的输出端口即可（见图 3-23b）。修改后的三相桥式可控整流电路图标上即增加了测量端，使用此测量端可以观测指定的晶闸管承受的电压和电流。

在晶闸管三相可控整流模型中可设置的参数有晶闸管的通态电阻和通态电感，以及缓冲电阻和电容值（见表 3-8），缓冲电阻和缓冲电容的设置要求与前相同。

表 3-8　三相桥式可控整流模块参数

参　数	单　位
导通电阻	Ω（欧姆）
导通电感	H（亨利）
缓冲电阻	Ω（欧姆）
缓冲电容	F（法拉）

3.8　多功能桥式电路模型

多功能桥式电路模型（见图 3-24）是一个既可以用作整流也可以用作逆变的模型，并且可以通过设置来改变它的相数和采用的电力电子开关类型。点击多功能桥模型图标，弹出模块的对话框如图 3-25 所示。在对话框中，第一栏是选择模型桥臂的相数，有 1、2、3 三种相数可供选择；第二栏用于选择模型是交流输入还是交流输出，如果是选择交流输入（ABC as input terminals），则输出就是直流，模型用于整流；如果选择是交流输出（ABC as output terminals），则输入端就需要连接直流，模型用于逆变。对话框的第五栏选择变流器使用的电力电子开关种类，这里有 MATLAB 模型库的六种开关可以选择，即二极管、普通晶闸管、GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关。其他缓冲电路和开关器件的参数设定与单个电力电子器件开关的参数设定相同，不过变流器模型中可设置的参数较少，也就是说，变流器模型使用的开关模型较简单。

图 3-24　多功能桥图标

如果在开关器件栏中选择二极管或晶闸管，则桥式线路的结构如图 3-26a 和图 3-26b 所示。其中，图 a 中交流在输入端，图 b 中交流在输出端，器件按自然导通顺序编号。如果在开关器件栏中选择的是自关断器件 GTO、MOSFET、IGBT 或理想开关，则桥式线路的结构如图 3-26c 和图 3-26d 所示。其中，图 c 中的交流在输入端，图 d 中的交流在输出端，器件不按导通顺序编号，两种编号方式是为与晶闸管 6 脉冲触发器和驱动模块 PWM 发生器输出的脉冲序列相对应。如果是自关断器件，模块在自关断器件上已经反并联了续流二极管。

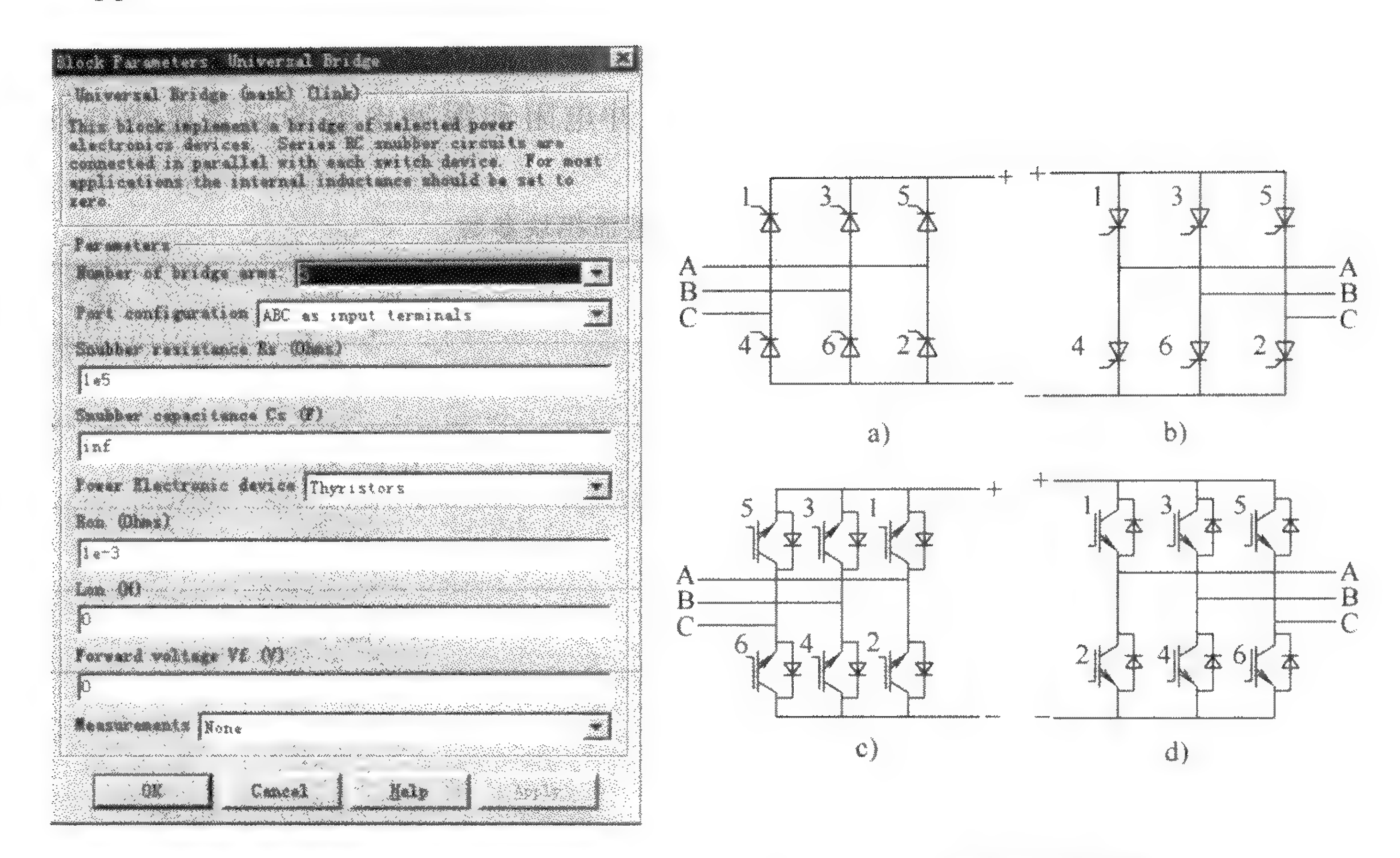


图 3-25 多功能桥模型对话框

图 3-26 多功能桥模型线路（三相）

3.9 驱动模型

电力电子器件工作的时候都需要有正确的门极控制信号，产生控制信号的驱动电路是电力电子线路必有的组成部分，并且晶闸管和其他自关断电力电子器件的驱动要求不同，因此 MATLAB 的电力系统模型库提供了两种驱动模型，一种是针对晶闸管电路的，另一种是适用于自关断器件电路的。MATLAB 电力电子器件模型的驱动要求与实际物理器件的驱动要求不同，实际物理器件的驱动要求信号有一定的强度，即要有一定的电压和电流，而器件模型的驱动仅仅是在于门极信号的有无，因此 MATLAB 驱动模块是原理性的宏模型。

3.9.1 同步 6 脉冲发生器

同步 6 脉冲发生器（Synchronized 6-Pulse Generator）用于产生三相桥式整流电路晶闸管的触发脉冲，在一周期内，它产生 6 个触发信号，每个触发信号的间隔是 60°。

6 脉冲发生器模块有 5 个输入端和 1 个输出端（图标见图 3-27）。输入端 alpha_deg 用于给定移相控制角的大小，控制角的单位是“度”。控制角既可以是固定值，也可以是变化值。固定的控制角可以用常数模块来设定，变化的控制角一般由控制电路来产生（参考整流电路一节）。

输入端 AB、BC、CA 用于接入同步信号。同步的作用是使触发器产生的触发信号与整流主电路晶闸管需要被触发的时刻相一致，并且要保证三相桥 6 个晶闸管按规定的顺序依次触发，因此同步信号要与晶闸管主电路的三相电源保持一定的相位关系，这一般用同步变压器来调整。6 脉冲发生器对话框如图 3-28 所示。6 脉冲发生器产生的六相触发脉冲与输入同步电压的相位关系如图 3-29 所示。图中上方是三相同步信号 u_{AB}、u_{BC}、u_{CA}，以下依次分别是 VT1 ~ VT6 6 个晶闸管的触发脉冲（图示为双脉冲触发），相邻两个晶闸管的触发相隔 60°。

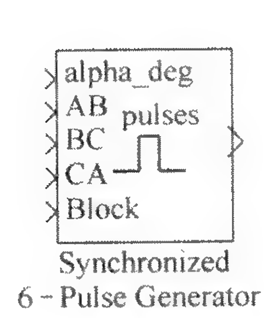


图 3-27　6 脉冲发生器图标

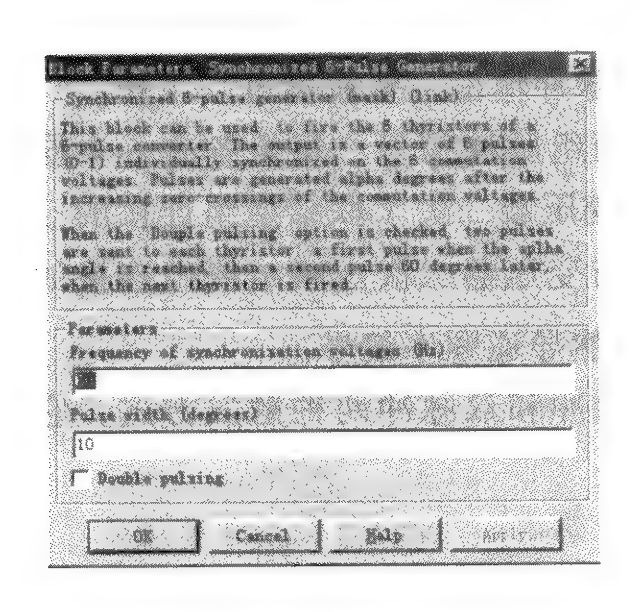


图 3-28　6 脉冲发生器对话框

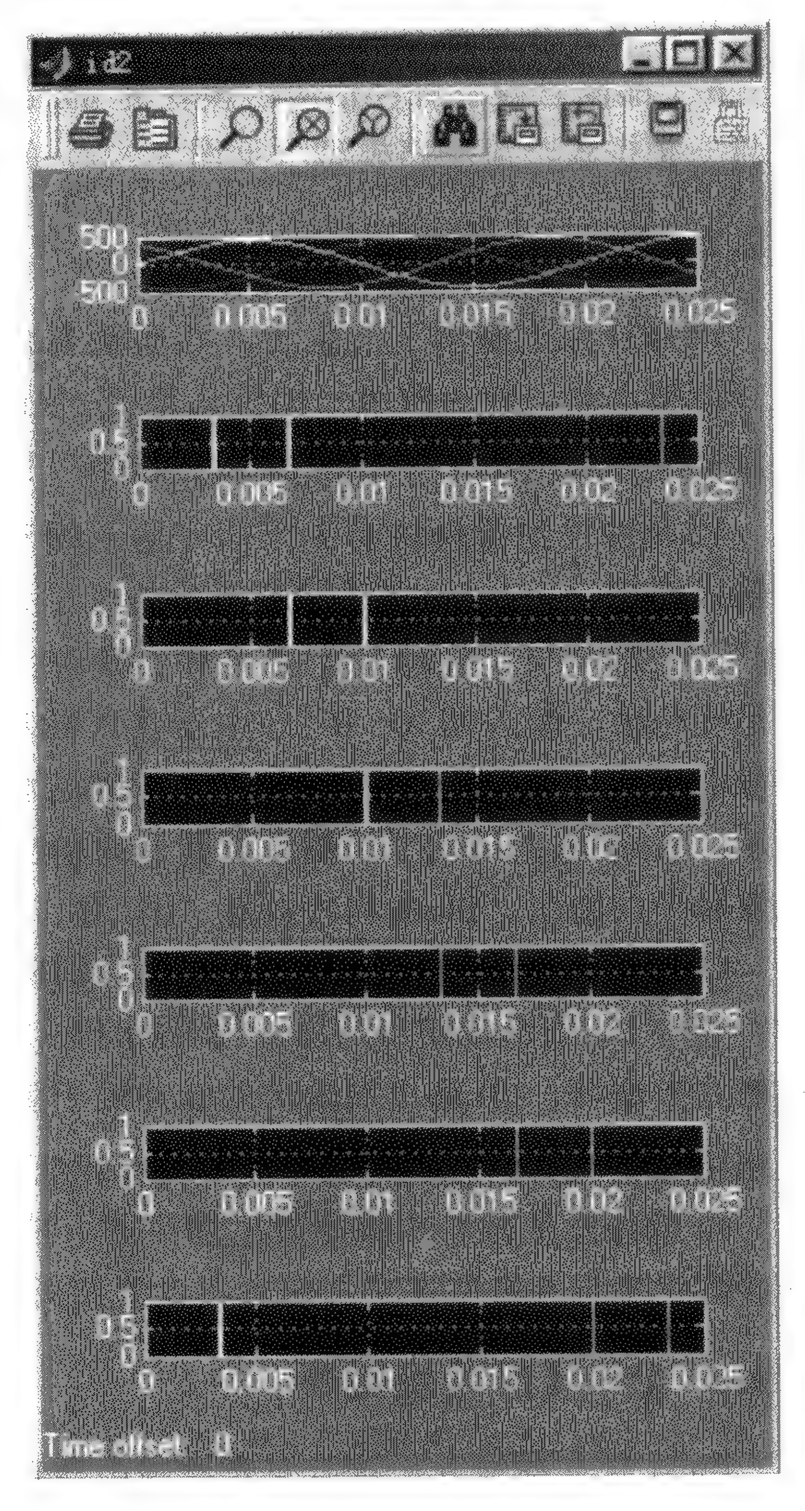


图 3-29　同步电压与触发脉冲

三相桥式整流电路有两种触发方式，即宽脉冲触发和双脉冲触发，两种触发方式可以在对话框中选择。双击三相桥模块，弹出对话框（见图 3-28），在对

话框中选中“Double pulsing”，则为双脉冲触发，否则为宽脉冲触发方式。同时在框中还可以设定脉冲的宽度和重复频率。在宽脉冲触发时，脉冲宽度要大于60°。重复频率应与整流器电源频率相同。图3-29中的脉冲是采用的双脉冲触发方式，即在下一个晶闸管触发的同时给前一个晶闸管补一个脉冲，以保证在电流断续时，整流器上下桥臂都各有一个晶闸管同时导通。

模块的第5个输入端（Block）用于控制触发脉冲的输出，在该端置“0”时，有脉冲输出；如果置“1”，则没有脉冲输出，整流器也不会工作。该端可以用作过电流保护和直流可逆系统中整流器的工作状态选择。

6个晶闸管触发脉冲信号由模块的pulses输出端输出，使用时只要将该输出端与三相桥式整流电路模型（见图3-22a）的脉冲输入端连接即可。

3.9.2 12脉冲发生器

12脉冲发生器用于产生十二相整流器的触发脉冲，其图标如图3-30所示。十二相整流器一般由两组三相桥式整流电路串联或并联组成，整流变压器可采用Y/Y-△或△/Y-△联结（见图3-31）。

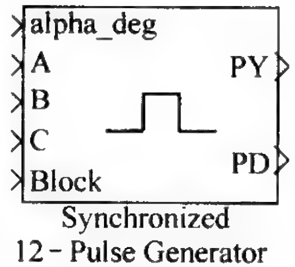


图3-30 12脉冲发生器

12脉冲发生器模块有5个信号输入端和2个输出端，其中输入端alpha_deg给定移相控制角的大小，控制角的单位是“度”。控制角与6脉冲发生器一样，既可以是固定值，也可以是变化值。输入端A、B、C用于接入同步电压信号，同步信号电压取与整流变压器一次相位相同的相电压，如图3-31所示。Block输入端用于控制触发脉冲的输出，当Block输入端置“1”时，停止触发脉冲的输出，Block输入端置“0”时，则有脉冲输出，整流器可以工作。

12脉冲发生器模块的两个输出端分别输出两组脉冲信号，每组各有6个脉冲，其中PY输出端输出的脉冲信号用于触发与变压器二次Y联结绕组连接的三相桥式整流器，PD输出端输出的脉冲用于触发与变压器二次△联结绕组连接的三相桥式整流器。三相桥式整流器的晶闸管按自然导通顺序编号。

12脉冲发生器与6脉冲发生器一样，有宽脉冲和双脉冲两种触发方式，它的参数设置与6脉冲发生器的参数设置相同。

3.9.3 PWM脉冲发生器

PWM脉宽调制方式在逆变器控制中使用很广泛，并且现在在整流电路中也开始应用。PWM脉冲发生器的图标如图3-32所示，MATLAB模型库提供的PWM脉冲发生器是一个多功能模块，它可以为GTO、FET、IGBT等自关断器件组成的一相、二相和三相桥式变流电路提供驱动信号，并且还可以用于双三相桥式电

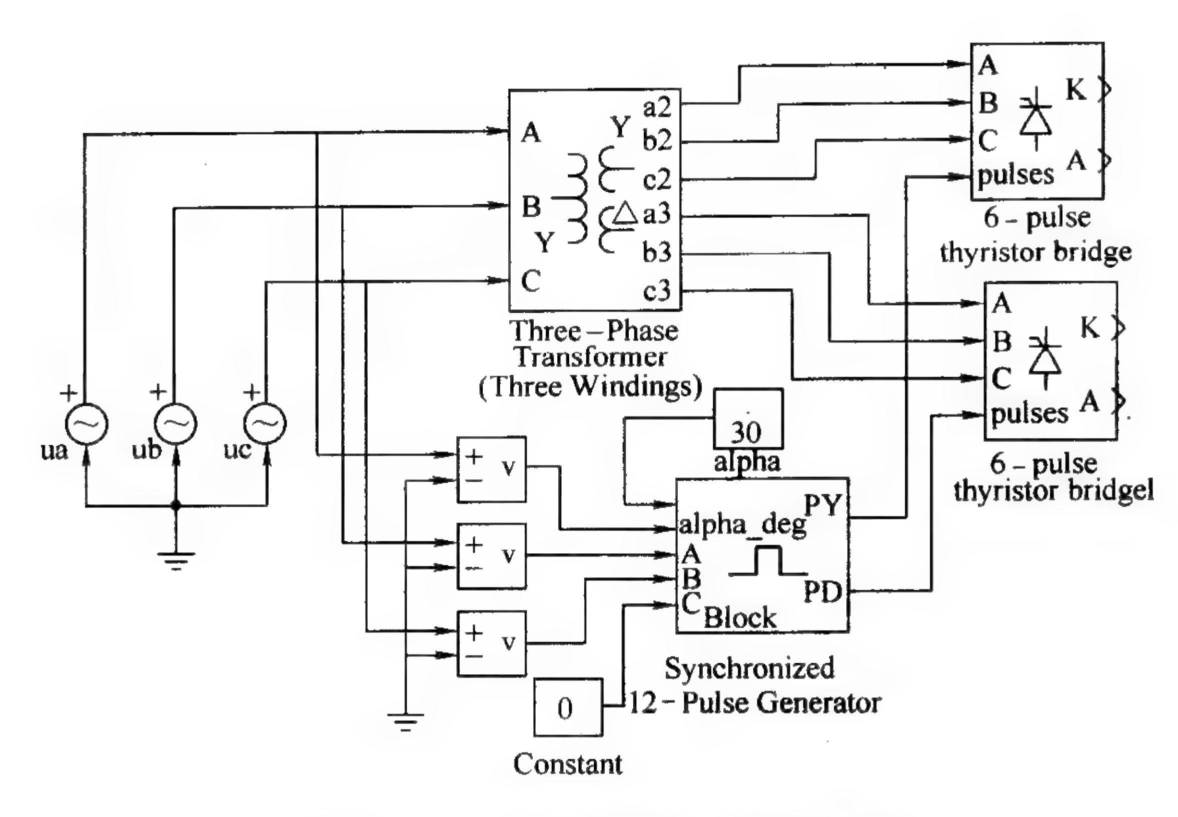


图 3-31　十二相整流器和触发器的连接

路（12 脉冲）的驱动，这可以在模块对话框中模式一栏（Generator Mode）选择（见图 3-33）。

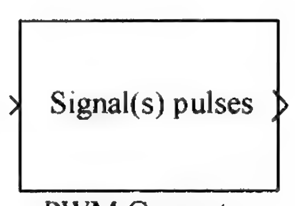


图 3-32　PWM 脉冲发生器图标

PWM 脉冲发生器脉宽调制的原理是以三角波（载波）与调制波比较，在三角波与调制波的相交点处产生脉冲的前后沿。三角波的频率可以在对话框中设置，且三角波的幅值固定为 1。调制波有两种产生方式，一种是由 PWM 脉冲发生器自动生成，另一种在脉冲发生器输入端由外部输入。点击对话框的内调制信号生成栏前的方块，则选中了内调制信号生成模式，对话框出现了调制度、输出电压频率和输出电压相位三项参数设置栏。在采用内调制信号生成模式时，调制波固定为正弦波，即 SPWM 调制方式，设置的调制度、输出电压频率和输出电压相位三项参数实际上是内部产生的调制正弦波的参数。选中内调制信号生成方式后，模块的输入端不用连接。当选择外部输入调制信号时，调制波的频率和相位则由外部输入的信号波形决定，但是外部输入的信号波形幅值不能大于 1。

图 3-34 所示为一相桥式电路采用正弦脉宽调制时的示意图。这时脉冲发生器输出两个脉冲 pulse1 和 pulse 2，分别对应驱动一相桥（A 相）的上桥臂开关器件 1 和下桥臂的开关器件 2，脉冲 pulse 1 和 pulse 2 是互补的（见图 3-35）。当在对话框中选择二相桥式电路时，脉冲发生器依次输出 4 个脉冲（pulse 1、pulse 2、pulse 3、pulse 4）。当在对话框中选择三相桥式电路时，脉冲发生器依次输出 6 个脉冲（pulse 1、pulse 2、pulse 3、pulse 4 、pulse 5、pulse 6），脉冲 pulse 1 和 pulse 2用于驱动 A 相桥臂的两个开关器件，pulse 3 和 pulse 4 用于驱动 B 相桥臂

的两个开关器件，pulse 5 和 pulse 6 用于驱动 C 相桥臂的两个开关器件，且单数脉冲驱动上桥臂开关器件，双数脉冲驱动下桥臂开关器件，参见图 3-26c 和图 3-26d。在使用时只需要将脉冲发生器的 pulses 输出端与多功能桥模块的 pulses 输入端相连接即可。

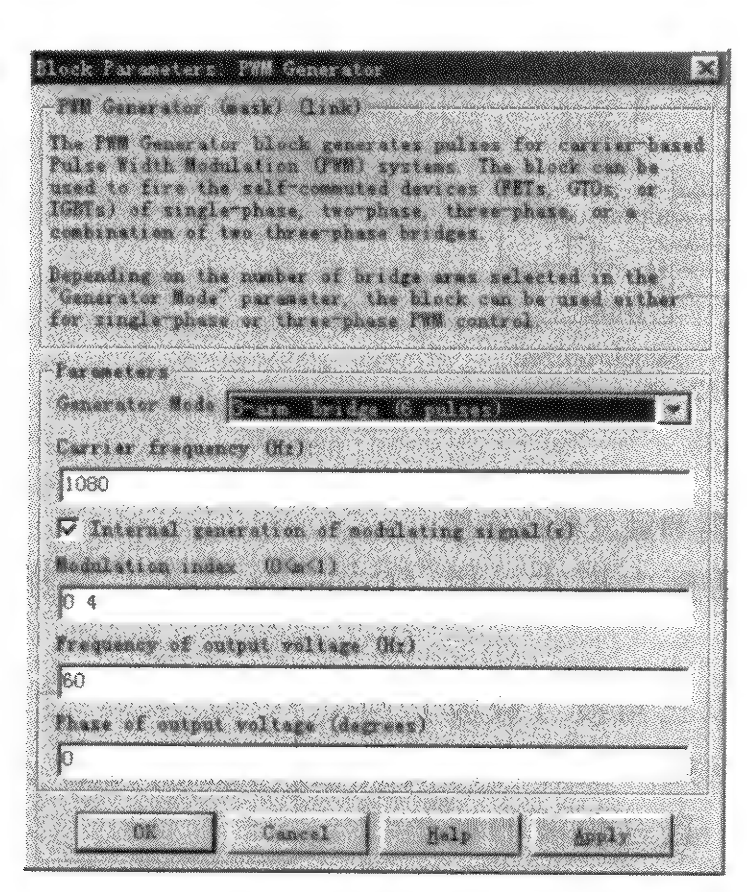


图 3-33　PWM 脉冲发生器对话框

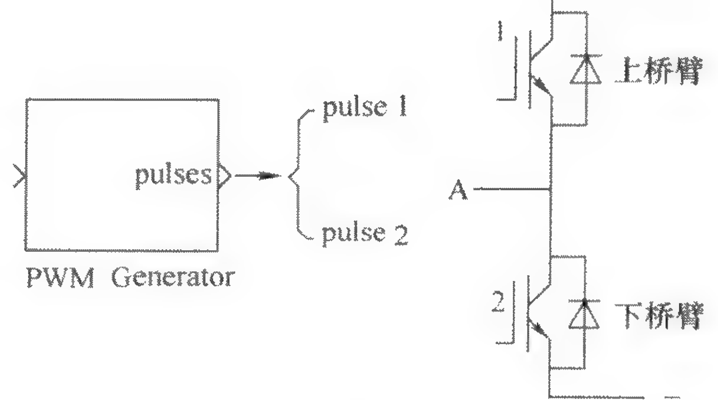


图 3-34　一相桥臂与驱动脉冲

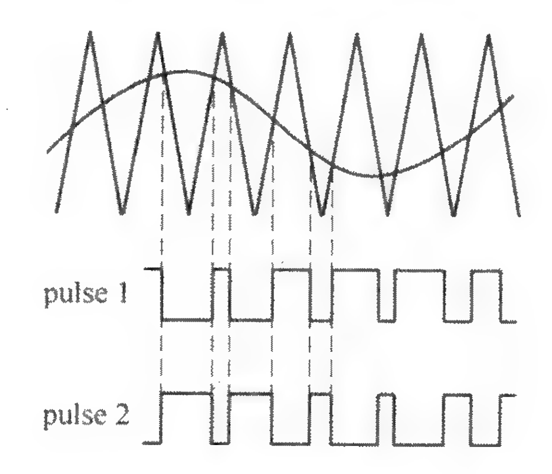


图 3-35　一相 PWM 调制原理

第 4 章　变压器和电动机模型

4.1　变压器模型

变压器是电力电子电路中的常用器件，MATLAB/SIMULINK/Power System 模型库中有单相变压器和三相变压器的模型，三相变压器还有多种联结组，并且还有一个带互感的线圈模型。

4.1.1　单相变压器模型

MATLAB 的单相变压器模型有两个：一个是线性变压器模型（图标见图 4-1a)，另一个是考虑了铁心饱和效应的饱和变压器模型（图标见图 4-1b)。下面主要介绍考虑铁心饱和的饱和变压器模型，线性变压器模型与饱和变压器模型相比，只是减少了反映铁心饱和特性的参数。

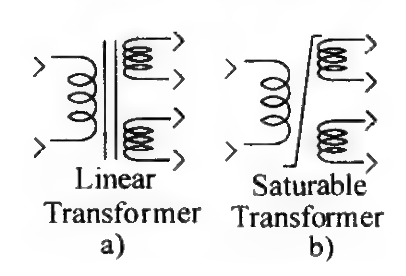


图 4-1　单相变压器模型图标
a）线性变压器　b）饱和变压器

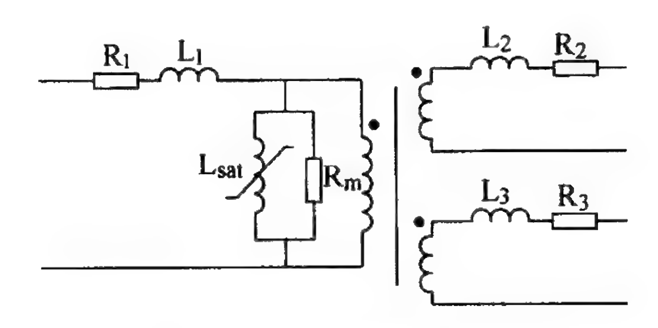


图 4-2　单相变压器模型（饱和铁心）

单相变压器模型电路如图 4-2 所示，变压器有一个一次绕组，两个二次绕组。如果设置第二个二次绕组参数 L_3、R_3（值为 L_3、R_3）为零，则模型的二次侧就只有一个绕组，并且模型图标也随之改变。模型中 R_1 和 L_1（值为 R_1 和 C_1）为一次绕组电阻和一次绕组漏感，R_2、R_3 和 L_2、L_3 分别为两个二次绕组的电阻和漏感。磁阻 R_m（值为 R_m）反映了铁心的磁阻损耗，L_{sat}（值为 L_{sat}）反映铁心的饱和特性。其模型的参数见表 4-1。

变压器参数中变压器容量、频率、电压使用标准单位，电阻和电感采用的是标幺值（pu)。标幺值和标准单位的换算为

$$R = \frac{R(\Omega)}{R_{base}}$$

$$L = \frac{L(H)}{L_{base}}$$

式中，$R_{base}=(U_1^2)/P_N$，$L_{base}=R_{base}/2\pi f_N$。

表 4-1 单相变压器模型参数

单相变压器参数		单 位
额定容量 P_N、频率 f_N		VA、Hz
绕组 1（一次侧）	额定电压 U_1	V（有效值）
	电阻 R_1、漏感 L_1	pu（标幺值）
绕组 2（二次侧 1）	额定电压 U_2	V（有效值）
	电阻 R_2、漏感 L_2	pu（标幺值）
绕组 3（二次侧 2）	额定电压 U_3	V（有效值）
	电阻 R_3、漏感 L_3	pu（标幺值）
饱和特性（线性变压器没有）	磁化电流 i_1、磁通 Φ（phi） （i_1 phi1；i_2 phi2；…）	pu（标幺值）
磁阻和剩磁通（线性变压器没有）	R_m、phi0	pu（标幺值）

变压器的饱和特性用分段线性化的磁化曲线来表述（见图 4-3），其中图 4-3a 所示为不考虑铁心剩磁作用时的磁化曲线，图 4-3b 所示为考虑了铁心剩磁作用的磁化曲线，图中纵坐标是磁通 Φ（phi），横坐标为磁化电流 i，磁通和磁化电流都使用标幺值。在参数对话框中磁化曲线的折点，以与折点对应的磁化电流 i 和磁通 Φ（phi）值依次输入，在电流和磁通间加空格，在两组电流和磁通间以“；”分隔。如果在对话框中选择了测量选项，则磁化电流和磁通都可以被测量，这时测量到的电流和磁通采用的是标准单位。磁化电流和磁通标幺值与标准单位的换算关系为

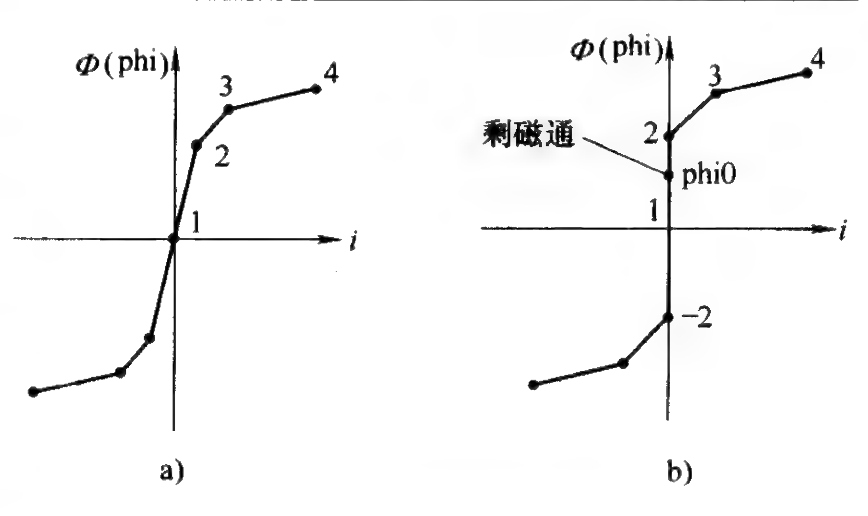


图 4-3 变压器磁化曲线

a）不考虑铁心剩磁作用时 b）考虑铁心剩磁作用时

$$\Phi = \Phi_{pu}\Phi_{base}$$

$$I = I_{pu}I_{base}$$

式中，$I_{base}=\sqrt{2}P_N/U_1$ $\Phi_{base}=\sqrt{2}U_1/(2\pi f_N)$。

磁阻 R_m 用来等效变压器铁心的损耗，在铁心损耗取 2%时，则 R_m（pu）= 500。如果在该栏中同时给定了剩磁通的标幺值，则变压器仿真从剩磁开始，如果没有给定剩磁通，则变压器仿真开始就是稳态。

4.1.2 三相变压器模型

MATLAB的三相变压器模型共有10个，分布在电器元件模块库（Elements Library）和其他电气模块库（Extra Library）的三相模块子集中，这里主要介绍电器元件模块库中的两个变压器模块。电器元件模块库中的两个变压器模块，其中一个有一组三相输入、一组三相输出，称为双绕组三相变压器（见图4-4a）；另一个是一组三相输入，两组三相输出，称为三绕组三相变压器（见图4-4b）。变压器的三相绕组无论在一次侧还是在二次侧都有多种联结组，可以在对话框中根据需要选择。可选择的绕组联结组见表4-2。

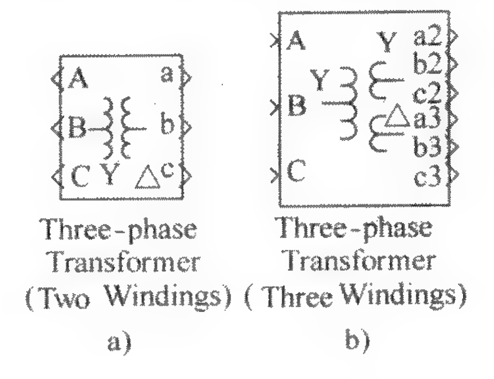


图4-4 三相变压器模型图标
a）双绕组 b）三绕组

表4-2 三相变压器的绕组联结

联结符号	三相绕组联结
Y	星形联结，无中线
Yn	星形联结，带中性点的联结
Yg	星形联结，中点在模型内接地
$\triangle_{11}$	三角形联结，电压相位领先Y联结30°
$\triangle_{1}$	三角形联结，电压相位滞后Y联结30°

三相变压器模型实际上是由三个单相变压器模型根据不同的联结组要求联结而成的，因此三相变压器的参数设置与单相变压器相同，其参数对话框如图4-5所示。在变压器参数中，变压器容量、电压、频率都使用标准单位制（VA、V、Hz），并且电压都用线电压有效值。电阻、电感都采用标幺值，标准单位与标幺值的换算见单相变压器一节。

三相变压器的铁心有饱和和不饱和两种，这可以在对话框中选择。如果未选饱和铁心一栏，磁路参数有磁阻 R_m 和励磁电感 L_m 两项，这两项都用标幺值。如果选择了饱和铁心一栏，则要求输入铁心磁化曲线的拐点参数。并且如果设置了剩磁通值，变压器仿真从剩磁开始，否则变压器仿真从零状态

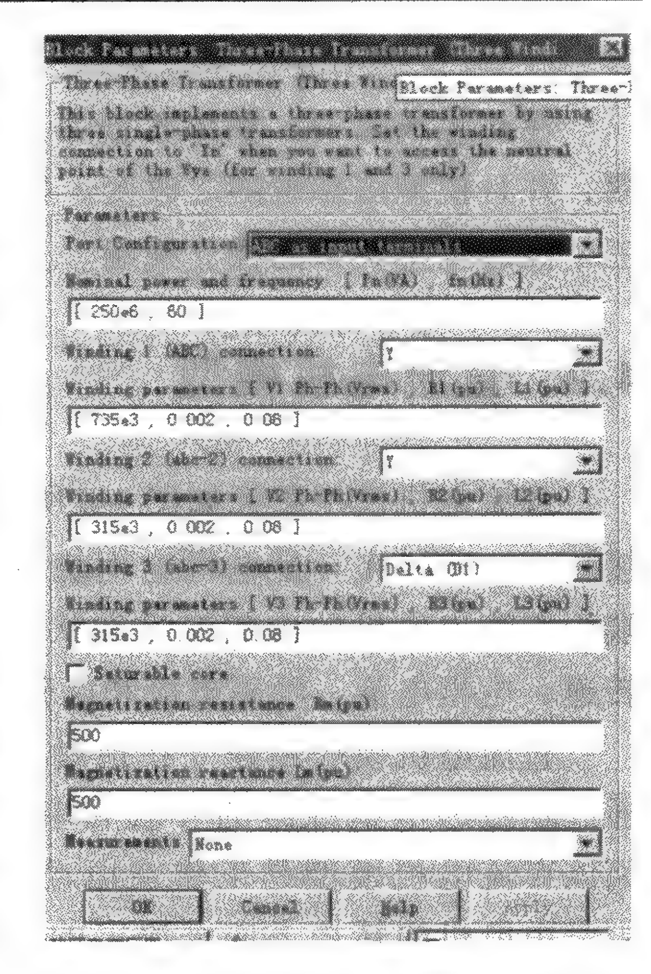


图4-5 三相变压器（三绕组）对话框

开始，并可以较快地进入稳态（参见单相饱和变压器）。

4.1.3 互感线圈

互感线圈是三个有互感关系的线圈，其模型图标如图 4-6 所示。这三个线圈有互相独立的输入端和输出端。在对话框（见图 4-7）中，可以分别设置三个线圈的电阻和自感，并且可以设置三个线圈间的互感，电阻、自感和互感都使用标准单位。

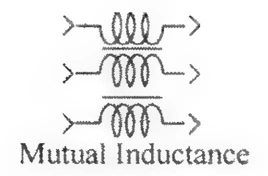


图 4-6　互感线圈模型图标

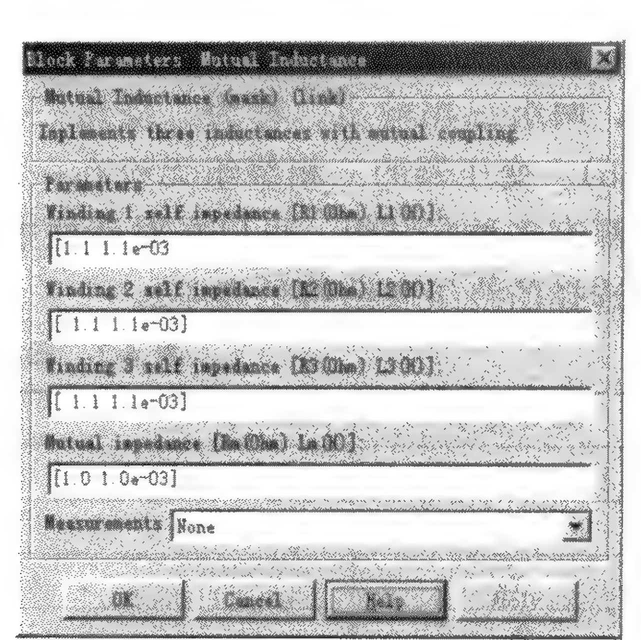


图 4-7　互感线圈对话框

在互感线圈中，如果不设第三个线圈的自感，则模型成为两个有互感的线圈，并且模型图标也随之改变。如果互感参数 R_m、L_m 都取零，则模型表示的是三个没有互感关系的独立线圈。互感线圈也是一个简单的变压器模型。

4.2 直流电机模型

直流电机模型图标如图 4-8 所示，图中 F + 和 F – 是直流电机励磁绕组的连接端，A + 和 A – 是电机电枢绕组的联结端，TL 是电机负载转矩的输入端。m 端用于输出电机的内部变量和状态，在该端可以输出电机转速、电枢电流、励磁电流和电磁转矩四项参数。

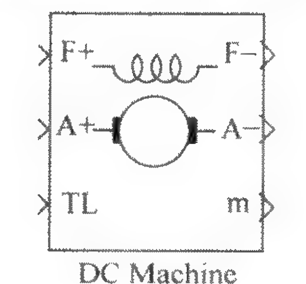


图 4-8　直流电机模型图标

直流电机模块是建立在他励直流电机基础上的，可以通过励磁和电枢绕组的并联和串联组成并励或串励电机。而该直流电机模型是工作在电动机状态还是发电机状态，则是由电机的转矩方向来决定的。他励直流电机模型参数见表 4-3。直流电机模型如图 4-9 所示。

表 4-3 他励直流电机模型参数

参　数	单　位
电枢电阻 R_a	Ω（欧姆）
电枢电感 L_a	H（亨利）
励磁和电枢互感 L_{aF}	H（亨利）
转动惯量 J	$kg \cdot m^2$
粘滞摩擦系数 B_m	N·m·s
干摩擦转矩 T_F	N·m
初始角速度	rad/s

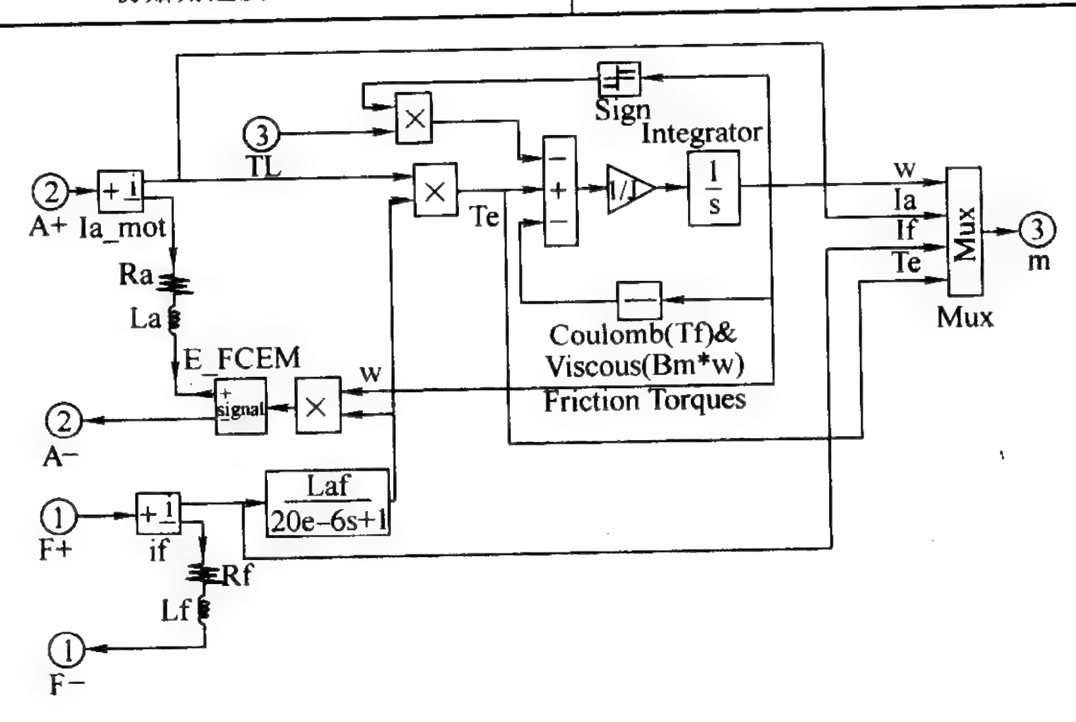


图 4-9　直流电机模型

励磁回路电压方程为

$$u_F = R_F i_F + L_F \frac{di_F}{dt}$$

式中，u_F、i_F 为直流电机励磁电压和电流；R_F、L_F 为励磁回路电阻和电感。

电枢回路电压方程为

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E$$

$$E = K_E \omega$$

或

$$E = \frac{2\pi}{60} K_E n$$

$$K_E = L_{aF} i_F$$

式中　u_a、i_a 为直流电机电枢电压和电流；R_a、L_a 为电枢回路电阻和电感；E

为电枢感应电动势；ω 为电机转子机械角速度（rad/s）；n 为转子转速（r/min）；K_E 为电动势常数；L_{aF}为磁场和电枢绕组间互感。

电机转矩方程为

$$T_e - T_L = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega$$

$$T_e = K_T i_a$$

式中，J 为转动惯量（$kg \cdot m^2$）；B 为粘滞摩擦系数（N·m·s）；K_T 为转矩系数，$K_T = K_E$。

当 $T_e > 0$ 时，电机工作在发电机模式；$T_e < 0$ 时，电机工作在电动机模式。

【例 4-1】 一台直流并励电动机，铭牌额定参数为 $P_N = 17kW$，$U_N = 220V$，$I_N = 88.9A$，$n_N = 3000r/min$，电枢回路总电阻 $R_a = 0.087\Omega$，励磁回路总电阻 $R_F = 181.5\Omega$，电动机转动惯量 $J = 0.76kg \cdot m^2$。要求仿真该电动机的直接起动的过程。

（1）计算电动机参数

励磁电流为

$$I_f = U_f/R_f = 220V/181.5\Omega = 1.21A$$

励磁电感在恒定磁场控制时可取零，则

电枢电阻 $R_a = 0.087\Omega$，电枢电感估算为

$$L_a = 19.1 \times \frac{CU_N}{2pn_N I_N} = 19.1 \times \frac{0.4 \times 220}{2 \times 1 \times 3000 \times 88.9}H = 0.0032H$$

式中，p 为极对数；C 为计算系数，对于无补偿电机 $C = 0.1$，无补偿电机 $C = 0.4$。

因为 $$C_e = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N} = \frac{220 - 0.087 \times 88.9}{3000}V \cdot min/r = 0.0708V \cdot min/r$$

$$K_E = \frac{60}{2\pi}C_e = \frac{60}{2\pi} \times 0.0708 = 0.676V \cdot s$$

因此 $$L_{af} = K_E/I_f = (0.676/1.21)H = 0.56H$$

额定负载转矩为

$$T_L = 9.55C_e I_{nom} = (9.55 \times 0.0708 \times 88.9)N \cdot m = 60.1N \cdot m$$

（2）绘制仿真线路

提取直流电动机、电源等元件模块，提取模块的名称及路径见表 4-4。联结模块绘制直流电动机直接起动的仿真模型如图 4-10 所示。在模型中电动机励磁绕组和电枢的输入端并联后与直流电源电压 Vd 的正极端相连接，电动机励磁绕组和电枢的输出端通过 T 形节点并联后与直流电源 Vd 的负极端连接在一起。电动机的负载转矩由常数模块 TL 设定。然后在电动机模块的 m 端接上示波器，用

于观察电动机的各项波形，由于在 m 端可以输出转速、电枢电流、励磁电流和转矩四项参数，因此需要用 Demux 模块分解。直流电动机模型输出转速的单位是 rad/s，在模型中使用了一个放大器（Gain）将 rad/s 转换为习惯的 r/min，变换系数为

$$k = \frac{60}{2\pi} = 9.55$$

表 4-4　直流电动机直接起动仿真线路模块

模块名	提取路径
直流电动机 DC motor	Power system/machines
直流电源电压 Vd	Power system/Electrical sources
T 形接点	Power system/connectors
常数模块 TL	Simulink/sources
信号分解 Demux	Simulink/Signals & system

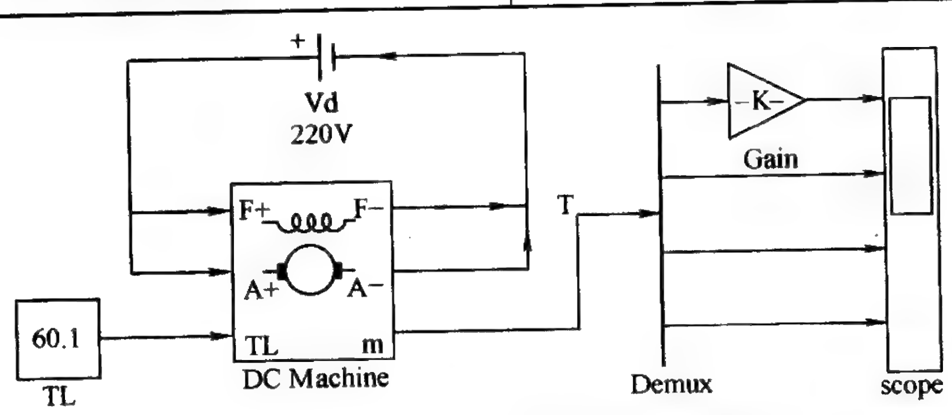


图 4-10　直流电动机直接起动仿真模型

(3) 设置模块参数和仿真参数

双击电动机模块图标，弹出模块参数对话框，在对话框中输入前面计算的电动机模型参数，在电源 Vd 模块对话框中输入“220”，在常数模块 TL 对话框中置入“60.1”。在完成元件模块参数设置后，在 Simulation 菜单下选择 Simulation parameters，设置仿真参数，取仿真时间为 1s，仿真算法采用 Ode45。

(4) 仿真及其结果

在各项参数设置完成后，点击菜单中的“▶”图标启动仿真。在仿真结束后，点击示波器，则可以观测电动机的转速、电流、转矩等波形，如图 4-11 所示，图中波形从上向下分别为电动机转速、电枢电流、励磁电流和电磁转矩。从波形中可见，电动机在带载起动时起动电流很大，最大可达 2500A。在起动 0.4s 后，转速达到 3000r/min，电流下降为额定值 89A 左右，转矩也有相应的变化。

【例 4-2】　在例 4-1 中，如果要用电阻起动器限制起动电流在 200 ~ 100A 之

间，通过仿真设计选择起动电阻和切换时间。

设计步骤 1：在例 4-1 直接起动线路基础上，在电枢回路中串联一个由三级电阻组成的起动器（见图 4-12）。在每个电阻（R1、R2、R3）上并联了一个理想开关，用于切除电阻，开关受 Step 模块控制。在 Step 模块对话框中设定单位阶跃信号发生时刻，即可控制开关的闭合，从而短接该级电阻。

步骤 2：将 step 模块 2 和 3 的阶跃信号发生时间设为“0”，即 R2、R3 在起动时就短接；Step1 的信号发生时间设长一些（如 20s），使 R1（其值为 R_1）接入电枢回路，并初选 R1′的值 R'_1

$$R'_1 = \frac{U_N}{I_{max}} - R_a = \frac{220}{200}\Omega - 0.087\Omega \approx 1\Omega$$

在模型中设 $R_1 = R'_1 = 1\Omega$，仿真开始启动，得到转速和电流波形如图 4-13a 所示，在图中可以看到串联电阻后最大起动电流为 200A，在 3.5s 时电流下降到 100A，对应的转

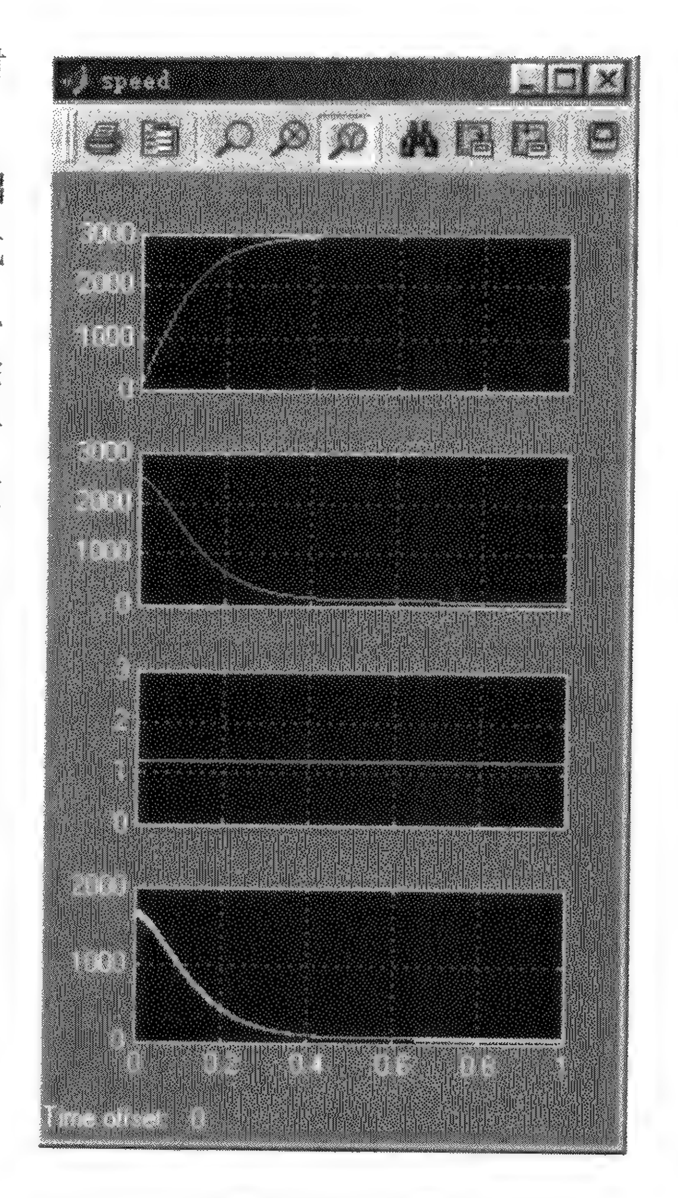


图 4-11　直流电动机直接起动波形

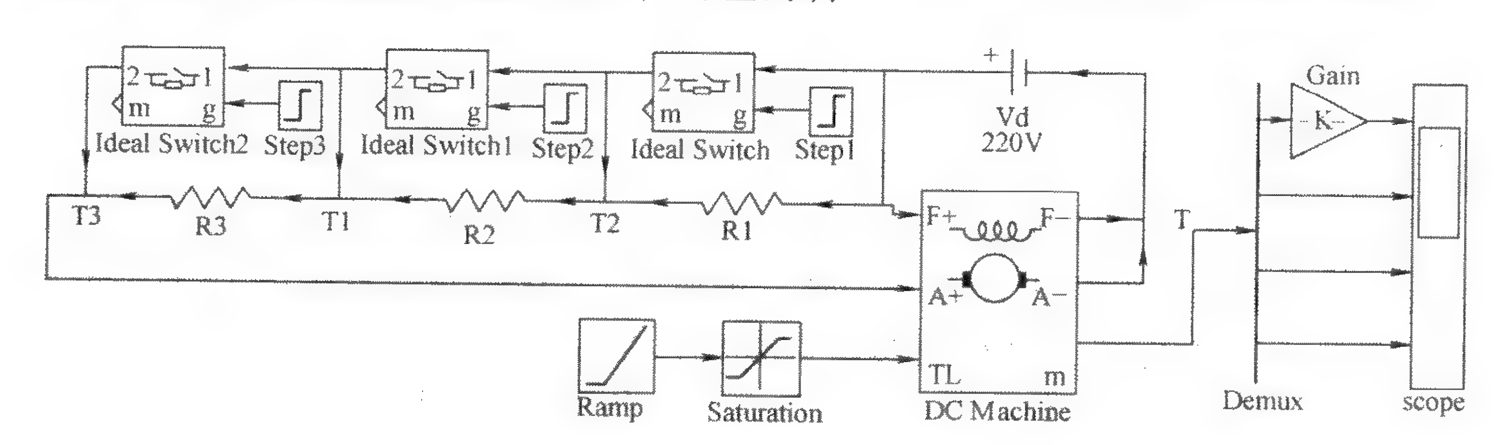


图 4-12　直流电动机串电阻起动仿真模型

速约为 1500r/min，这时需要减小起动电阻，因此可计算 R1 的值 R_1 和预选 R2′的值 R'_2。

$$R'_2 = \frac{U_N - C_e n}{I_{max}} - R_a = \frac{220 - 0.0708 \times 1500}{200}\Omega - 0.087\Omega = 0.482\Omega$$

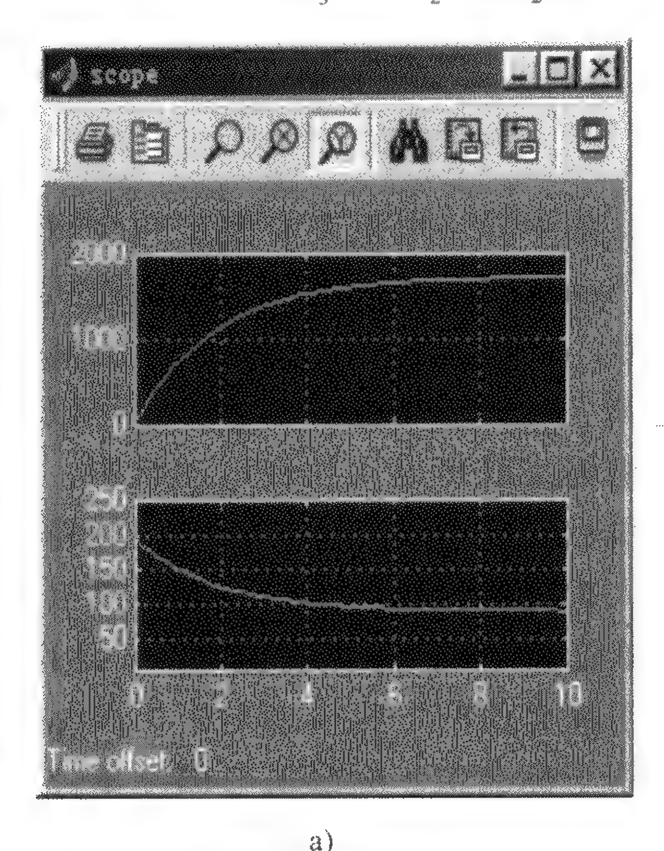
$$R_1 = R'_1 - R'_2 = 1\Omega - 0.482\Omega = 0.518\Omega$$

步骤 3：重新设定 R1 和 R2（$R_2 = R'_2$）并设 Step1 的信号发生时间为 3.5s，

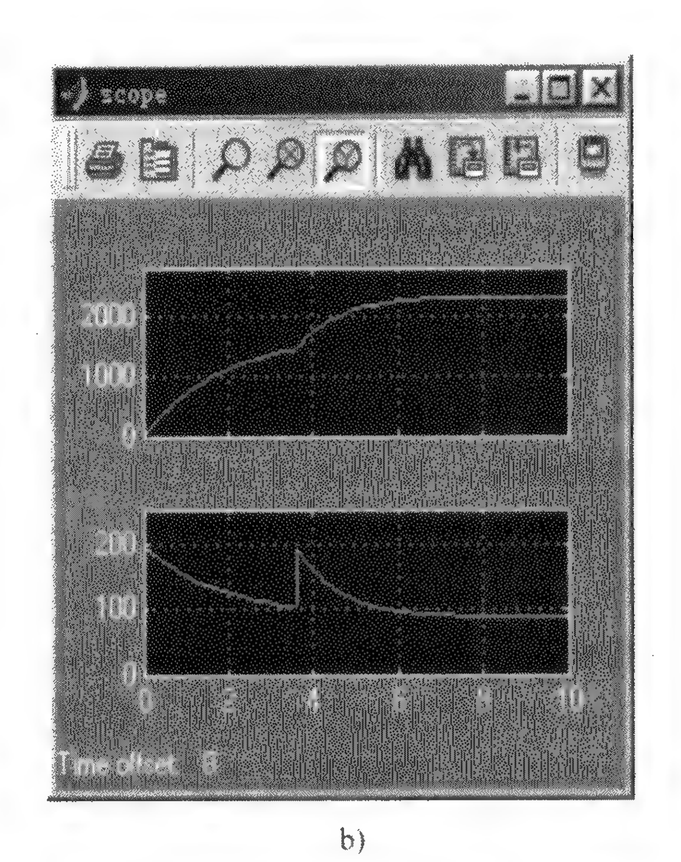
设 Step2 的信号发生时间为 20s。再次仿真得到如图 4-12b 所示的波形，在起动 6s 后电流再次下降到 100A，这时的转速在 2200r/min，需要再次减小起动电阻。计算 R2 和 R3 的值 R_2 和 R_3。

$$R_2 = \frac{U_N - C_e n}{I_{max}} - R_a = \frac{22 - 0.0708 \times 2200}{200}\Omega - 0.087\Omega = 0.32\Omega$$

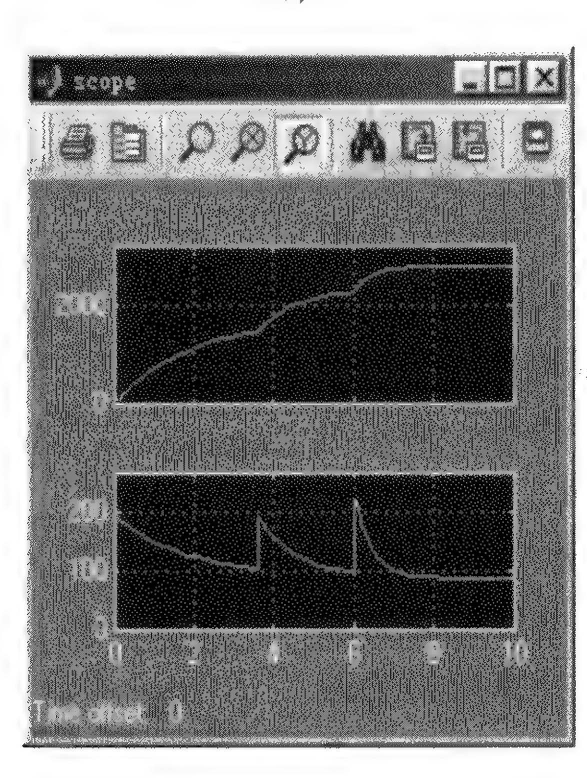
$$R_3 = R_2' - R_2 = 0.482\Omega - 0.32\Omega = 0.162\Omega$$



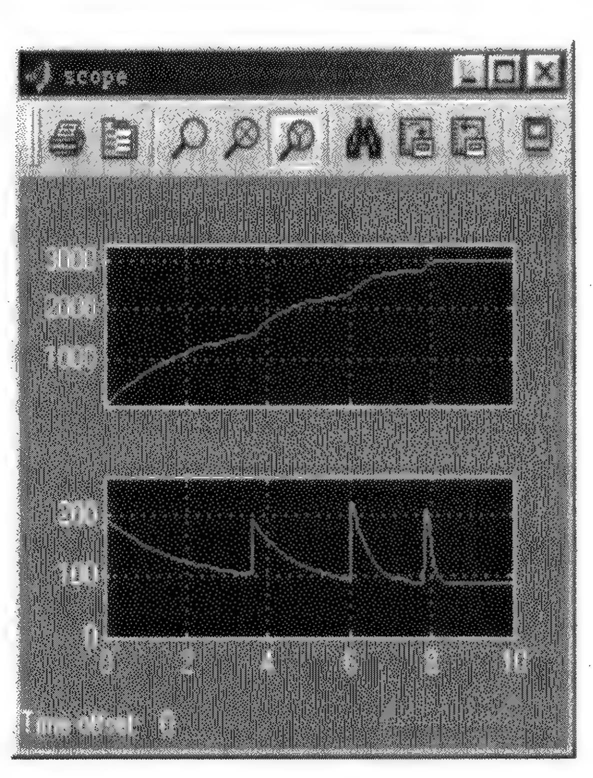
a)



b)



c)



d)

图 4-13　串电阻起动时的转速和电流波形

步骤 4：重新设定 R2 和 R3，并设 Step2 的信号发生时间为 6s，设 Step3 的信号发生时间为 20s，再次仿真得到图 4-12c 所示的波形。在起动 8s 后电流再次下降到 100A，对应的转速在 2800r/min，需要再次减小起动电阻，即切除 R3，因此可以设 Step3 的信号发生时间为 8s，再次仿真得到图 4-12d 所示的波形，在切除 R3 后，转速升到 3000r/min，在整个起动过程中电流都限制在规定的范围内，起动器的电阻和切换时间设计完毕。

4.3 交流电机模型

交流电机有异步电机和同步电机两类，其中异步电机又有笼型和绕线转子两种。交流电机的模型比较复杂，在 Power System 元件库中保存了交流电机的模型。交流电机模型建立在两相坐标系基础上，通过模型的 m 端不仅可以观测到在三相坐标系上和两相坐标系上表达的电流、转矩和转速等参量，还可以观测到电机的磁场，使用是很方便的。交流电机模型既可以工作在电动状态，也可以工作在发电状态，这主要区别在于输入机械转矩的极性，若输入机械转矩极性为正，则电机工作于电动机状态，若输入机械转矩极性为负，则电机工作于发电机状态。交流电机的模型有使用国际单位制（SI）和标幺值（pu）的两种，这里主要介绍使用国际单位制的模型，采用标幺值的电机模型与采用国际单位制的模型相同，不同仅在于参数的表示使用了标幺值。标幺值与国际单位的换算可以参考变压器一节。

4.3.1 三相交流异步电机模型

在元件库中交流异步电机的模型图标有两个（见图 4-14），一个采用标幺值（pu）的模型，一个是使用国际单位制的模型。两个异步电机的模块都有四个输入端，四个输出端。输入端 A、B、C 用于联结三相电源，Tm 输入端用于输入机械转矩。输出端 a、b、c 是绕线转子电机的三相转子绕组的外接端，如果是笼型异步电机，这三端将在模型内部短接。m_pu 输出端将与电机测量单元连接，用于观测电机的工作状态。

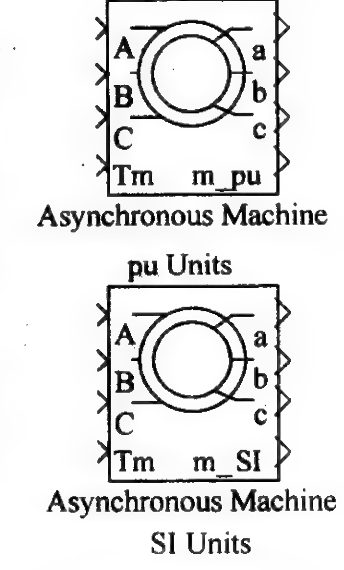


图 4-14 三相交流异步电机模型图标

三相异步电机的模型是首先将三相输入电压变换为两相坐标系（dq 坐标系）上的电压，同时也将计算所得的两相坐标系上的电流变换为三相坐标系上的电流，变换关系如下：

从三相坐标系/两相坐标系的电压变换为

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta \\ 2\sin\theta & \sin\theta - \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_{abs} \\ U_{bcs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U'_{qr} \\ U'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2\cos\beta & \cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta \\ 2\sin\beta & \sin\beta - \sqrt{3}\cos\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U'_{abr} \\ U'_{bcr} \end{bmatrix}$$

从两相坐标系/三相坐标系的电流变换为

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \dfrac{-\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta}{2} & \dfrac{-\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ \dfrac{-\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta}{2} & \dfrac{-\sqrt{3}\cos\beta - \sin\beta}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs}$$

$$i'_{cr} = -i'_{ar} - i'_{br}$$

式中，θ 为两相坐标系与定子三相坐标系的位置角，$\beta = \theta - \theta_r$ 为两相坐标系与转子三相坐标系的位置角 β。

建立在两相坐标系上的异步电动机方程如下：

电压方程为

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt}\Psi_{qs} + \omega\Psi_{ds}$$

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt}\Psi_{ds} - \omega\Psi_{ds}$$

$$U'_{qr} = R'_{qr} i'_{qr} + \frac{d}{dt}\Psi'_{qr} + (\omega - \omega_r)\Psi'_{dr}$$

$$U'_{dr} = R'_{dr} i'_{dr} + \frac{d}{dt}\Psi'_{dr} - (\omega - \omega_r)\Psi'_{qr}$$

其中

$$\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{qr}$$

$$\Psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\Psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

电磁转矩为

$$T_e = 1.5p(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds})$$

机械方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\omega_m = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m)$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\theta_m = \omega_m$$

式中，R_s、L_{ls}为定子电阻和漏感；R_r、L_{lr}为转子电阻和漏感；L_m 为定转子互感；L_s、L_r'为定子和转子自感；U_{qs}、i_{qs}为定子电压和电流在 q 轴上的分量；U_{qr}、i_{qr}为转子电压和电流在 q 轴上的分量；U_{ds}、i_{ds}为定子电压和电流在 d 轴上的分量；U_{dr}、i_{dr}为转子电压和电流在 d 轴上的分量；Ψ_{qs}、Ψ_{ds}为定子磁链的 q 轴和 d 轴分量；Ψ_{qr}、Ψ_{dr}为转子磁链的 q 轴和 d 轴分量；ω_m 为转子角速度；θ_m 为转子位置角；p 为电机极对数；ω_r 为转子角频率（$\omega_m \times p$）；θ_r 为转子位置电角度（$\theta_m \times p$）；T_e 为电磁转矩；J 为转子和负载的转动惯量；H 为转子和负载的惯性常数；F 为摩擦系数。

图 4-15 所示为异步电机在两相坐标上的等效电路。

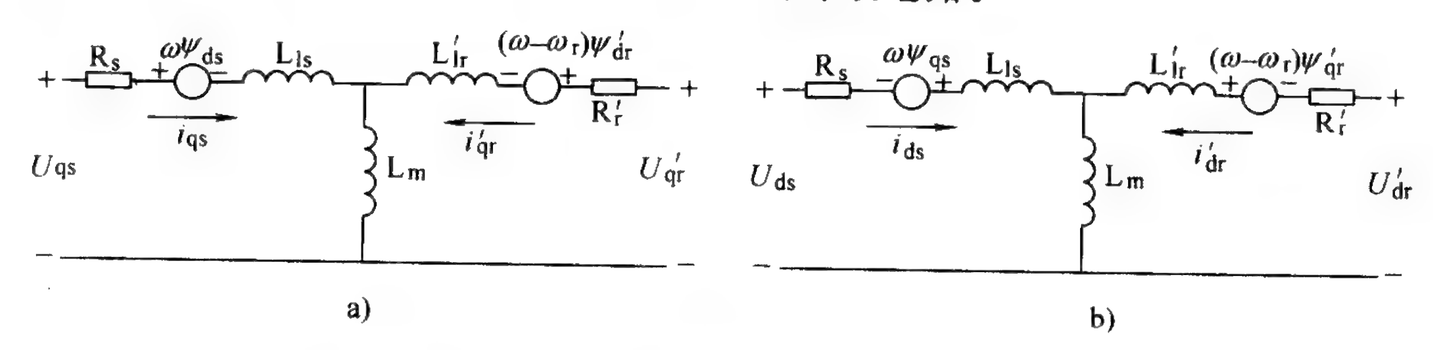


图 4-15　异步电机在两相坐标系上的等效电路
a) q 轴　b) d 轴

异步电机的参数设置对话框如图 4-16 所示。在对话框中第一项是转子类型的选择，其中有绕线转子（Wound）和笼型（Squirrel-cage）两种可选。第二项是参考坐标系，其中有旋转坐标系（Rotor，Park 变换）、静止坐标系（Stationary，αβ 变换）和同步旋转坐标系（Synchronous）三种可选择。异步电机的参数见表 4-5。

表 4-5　异步电机参数

参　数　名	单位
额定容量 P_n、额定电压 U_n、额定频率 f_n	VA、V_{rms}、Hz
定子绕组电阻 R_s、漏感 L_{ls}	pu
转子子绕组电阻 R_r'、漏感 L_{lr}'	pu
定转子绕组互感 L_m	pu
转动惯量 J、摩擦系数 F、极对数 p	kg·m^2
初始条件	

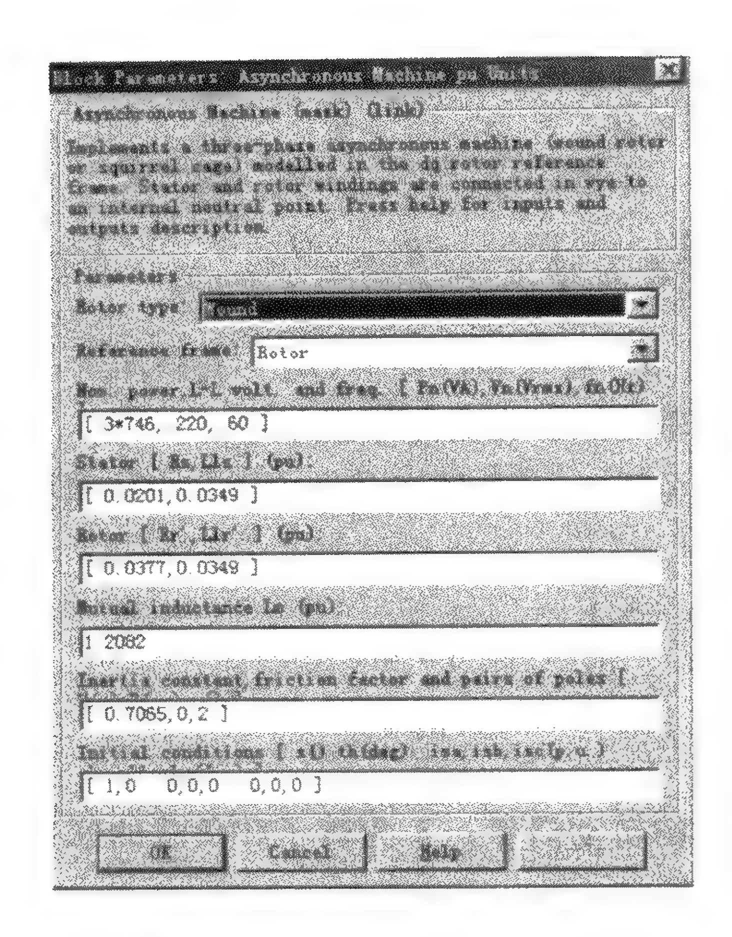


图 4-16 异步电机参数对话框

在电机参数中转子参数（电阻和漏感）都折算到定子侧，初始条件包括转差率 s、电角度、定子电流大小和相位等。

三相异步电机模型没有考虑定转子铁心的饱和问题。

在异步电机模型的测量端可测量的参数有转子电流、定子电流、转子磁链、定子磁链、转速和转矩等。

4.3.2 交流永磁同步电机模型

永磁同步电机模型图标如图 4-17 所示。该模型图标有四个输入端，一个输出端，其中输入端 A、B、C 连接三相电压，输入端 Tm 接入机械转矩信号。输出端 m 用于测量和观察同步电机的工作状态。

A
B
C
Tm
N
S
m
Permanent Magnet
Synchronous Machine

图 4-17 永磁同步电机模型图标

永磁同步电机模型可以工作于发电机状态或电动机状态，它的工作方式取决于输入机械转矩的极性，如果输入机械转矩为正，则工作在电动机状态，如果输入机械转矩为负，则工作在发电机状态。永磁同步电机模型的电气部分和机械部分都用二阶状态方程表示，并且模型假定定子磁通是正弦分布的，因此产生的感应电动势也是正弦的。因为一般永磁同步电机气隙比较大，因此模型没有考虑定子磁路的饱和和铁损，并且永磁同步电机模型建立在两相旋转坐标系（dq 坐标系）上，所有参数也折算到旋转坐标系上。电机方程如下：

电路方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{d}} = \frac{1}{L_{\mathrm{d}}}u_{\mathrm{d}} - \frac{R}{L_{\mathrm{d}}}i_{\mathrm{d}} + \frac{L_{\mathrm{q}}}{L_{\mathrm{d}}}p\omega_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{q}}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{q}} = \frac{1}{L_{\mathrm{q}}}u_{\mathrm{q}} - \frac{R}{L_{\mathrm{q}}}i_{\mathrm{q}} - \frac{L_{\mathrm{d}}}{L_{\mathrm{q}}}p\omega_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{d}} - \frac{\lambda p\omega_{\mathrm{r}}}{L_{\mathrm{q}}}$$

$$T_{\mathrm{e}} = 1.5p[\lambda i_{\mathrm{q}} + (L_{\mathrm{d}} - l_{\mathrm{q}})i_{\mathrm{d}}i_{\mathrm{q}}]$$

式中，L_{q}、L_{d} 为 q、d 轴电成；R 为定子绕组电阻；i_{q}、i_{d} 为 q、d 轴电流分量；u_{q}、u_{d} 为 q、d 轴电压分量；ω_{r} 为转子角速度；p 为极对数；T_{e} 为电磁转矩。

机械方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\omega_{\mathrm{r}} = \frac{1}{J}(T_{\mathrm{e}} - F\omega_{\mathrm{r}} - T_{\mathrm{m}})$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega_{\mathrm{r}}$$

式中，J 为转子和负载的转动惯量；F 为转子和负载的摩擦系数；θ 为转子位置角；T_{m} 为轴上机械转矩。

永磁同步电机模型对话框如图 4-18 所示，对话框中参数设置见表 4-6。

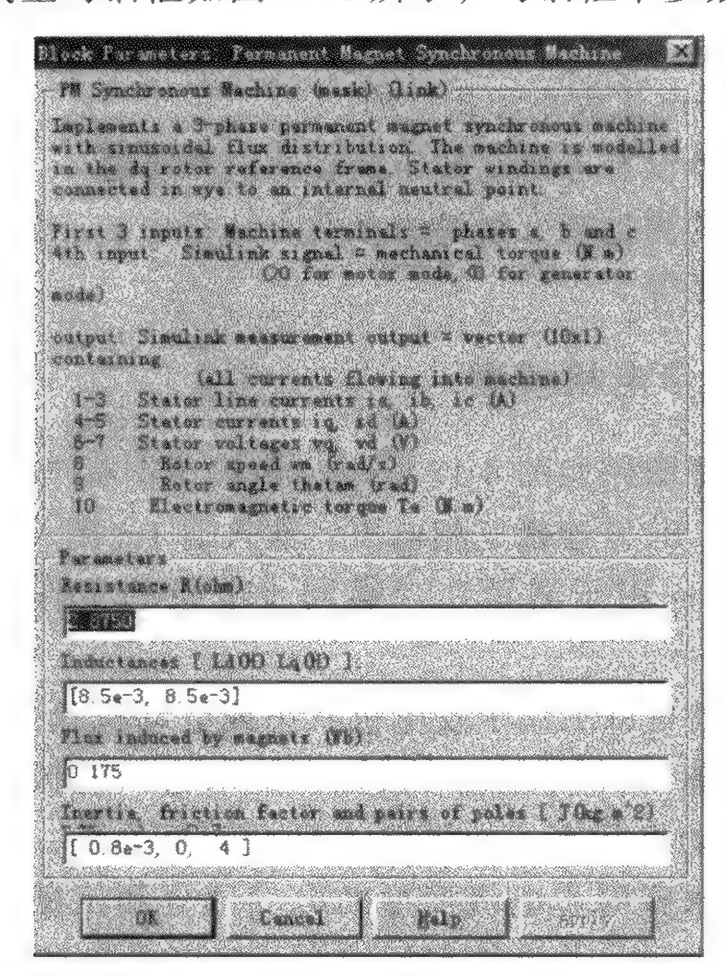


图 4-18 永磁同步电机模型参数对话框

从永磁同步电机模型的输出端可以输出永磁同步电机的 10 个内部参数（通过电机模型测量模块观测），输出参数见表 4-7。

表 4-6　永磁同步电机模型参数

参数名	单　位
定子电阻 R	Ω（欧姆）
定子电感 Ld、Lq（dq 轴系）	H（亨利）
由永磁转子在定子回路产生的磁通 λ	Wb（韦伯）
转子和负载的转动惯量 J	$kg\cdot m^2$
粘滞摩擦系数 F	N·m·s
电机极对数 p	

表 4-7　永磁同步机模型可测参量

参数名	单　位
线电流 i_a、i_b、i_c	A
d 轴和 q 轴电流 i_d、i_q	A
d 轴和 q 轴电压 u_d、u_q	V
转子机械角速度 ω_r	rad/s
转子位置角 θ	rad
电磁转矩 T_m	N·m

4.3.3　交流同步电机模型（基本型）

同步电机模型图标如图 4-19 所示，同步电机模型既可以工作在电动机状态，也可以工作在发电机状态。模型的输入端 Pm 用于输入电机轴上的机械功率，在电动机工作状态时，该输入端一般是连接一个常数模块或函数模块，使电机负载机械功率以常数或函数形式输入；如果电机工作于发电机状态，则该端连接常数、函数或原动机（水轮机和调速器、汽轮机和调速器）。第二个输入端 Vf 用于接入励磁电压，在电动机状态下，一般是连接常数模块，励磁电压以常数表示；如果是发电机状态，则可以连接励磁系统模块（Excitation System Block）。模型的输出端 A、B、C 为三相定子的接线端，输出端 m 用于连接电机的测量模块。

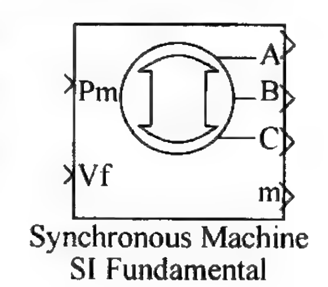


图 4-19　同步电机模型图标

同步电机的数学模型建立在两相旋转 dq 坐标系上，模型反映了定子磁场和阻尼绕组的动态过程。同步电机动态模型在两相坐标系上的等效电路如图 4-20 所示，图中转子参数都折算到定子一侧。

电压方程为

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}\Psi_d - \omega_r \Psi_q$$

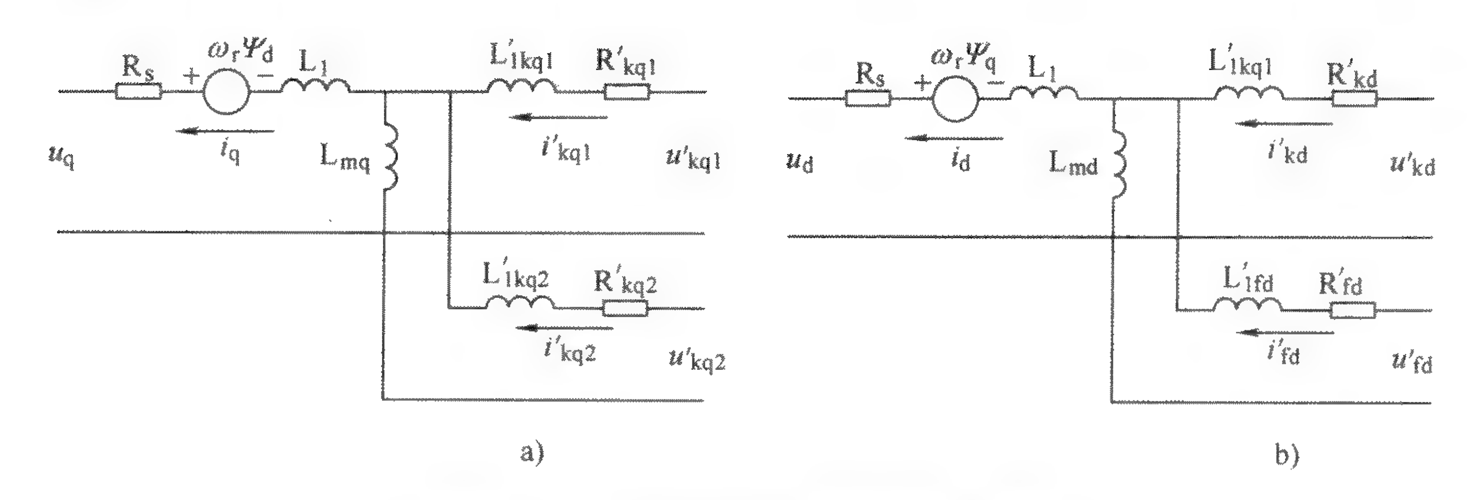


图 4-20　同步电机动态模型等效电路

a) q 轴　b) d 轴

$$u_{q} = R_{s} i_{q} + \frac{d}{dt}\Psi_{q} + \omega_{r}\Psi_{d}$$

$$u'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt}\Psi'_{fd}$$

$$u'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt}\Psi'_{kd}$$

$$u'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt}\Psi'_{kq1}$$

$$u'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt}\Psi'_{kq2}$$

磁链方程为

$$\Psi_{d} = L_{d} i_{d} + L_{md}(i'_{fd} + i'_{kd})$$

$$\Psi_{q} = L_{q} i_{q} + L_{mq} i'_{kq}$$

$$\Psi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md}(i_{d} + i'_{kd})$$

$$\Psi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md}(i_{d} + i'_{fd})$$

$$\Psi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_{q}$$

$$\Psi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_{q}$$

注意，式中变量下标的含义如下：d、q 代表 d 轴和 q 轴分量；r、s 代表转子或定子参数，l、m 代表漏感或励磁电感；f、k 代表励磁或阻尼绕组。

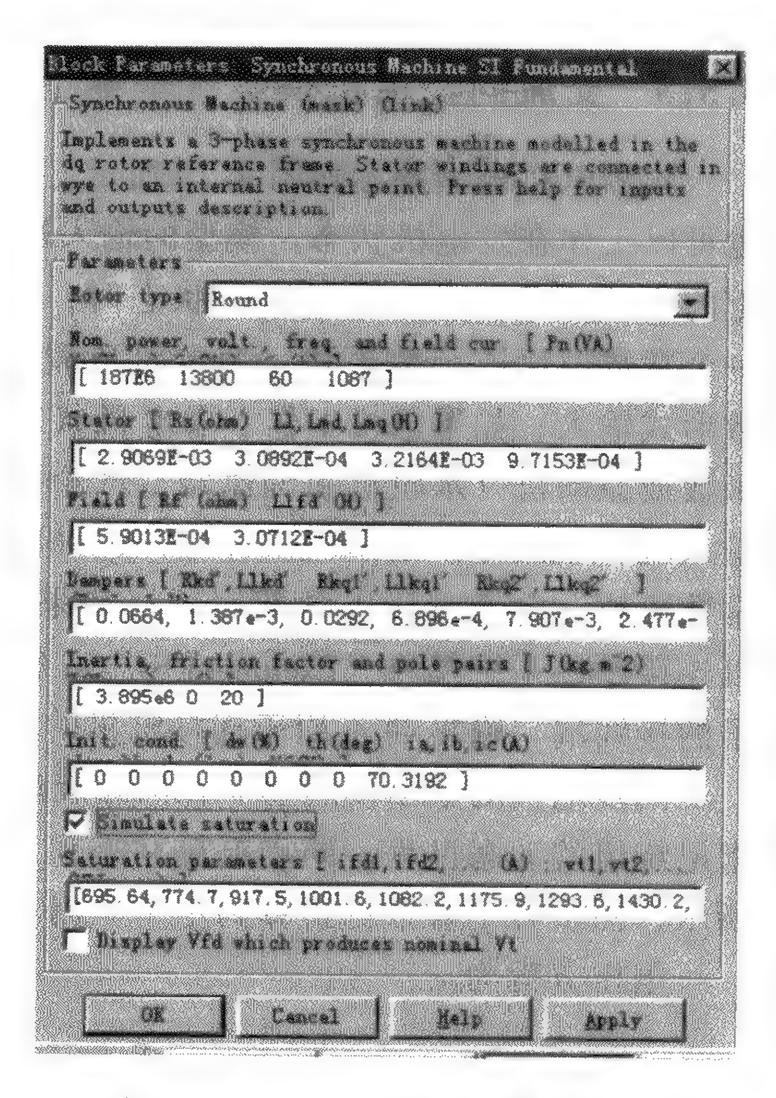


图 4-21　同步电机参数设置对话框

同步电机参数设置对话框如图 4-21 所示，对话框第一栏用于选择转子的类型，凸极式（Salient-pole）或隐极式（Round、Cylindvical）。对话框的以

下各栏用于设置同步电机的参数，见表 4-8。

同步电机的初始条件包括初始速度 dw，转子角 θe（电角度）线电流 ia、ib、ic，相位角 pha、phb、phc 和励磁电压 Vf，其中初始速度以额定转速的百分数表示。关于励磁电压的设定有两种情况，如果在额定参数一栏中设定了励磁电流 ifN，则初始励磁电压（直流）是参考于转子侧的，并且这个参考电压可以从对话框最后一栏（Dislay Vfd…）中得到，只要点击该栏则可弹出提示框，框中给出了 Vt 的值（见图 4-22）。如果在额定参数一栏中没有设定励磁电流 ifN，即该项取“0”，则励磁电压是参考于定子的，参考于定子的励磁电压同样可以从点击对话框最后一栏得到。

表 4-8　同步电机模型参数

参　　数		单　　位
电机额定参数 Norminal	容量 Pn	VA
	线电压 Vn	V（有效值）
	频率 fn	Hz
	励磁电流 i_{fN}	A
定子 Stator	电阻 Rs	Ω
	漏感 Lls、Lmd、Lmq	H
励磁绕组 Field	电阻 Rf′	Ω
	漏感 Llfd′	H
阻尼绕组 Dampers	d 轴电阻 Rkd′、漏感 Llkd′	Ω、H
	q 轴电阻 Rkq1′、漏感 Llkq1′	Ω、H
	对隐极机还有电阻 Rkq2′漏感、Llkq2′	Ω、H
机械参数	转动惯量 J	$kg \cdot m^2$
	摩擦系数 D	N·m·s/rad
	极对数	

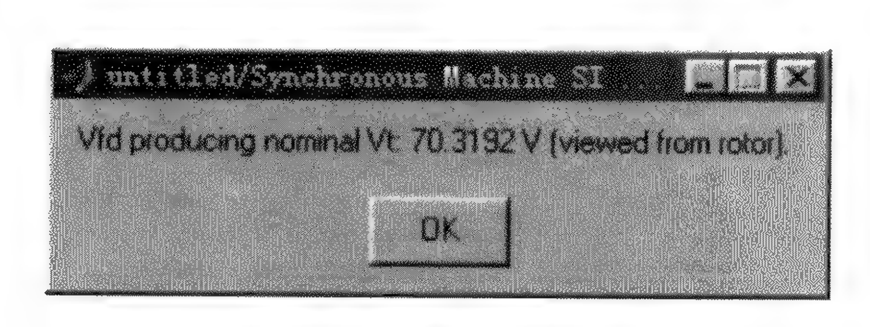


图 4-22　励磁电压提示框

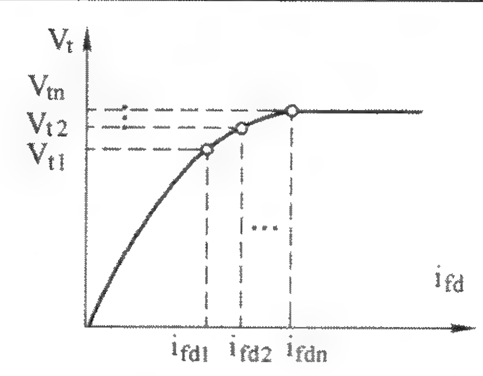


图 4-23　铁心饱和曲线

同步电机模型可以考虑铁心的饱和现象，这时只要选中参数设置对话框的最后第二栏 Simulate saturation。铁心的饱和是以饱和曲线来表示（见图 4-23），曲

线的横坐标是励磁电流 ifd，纵坐标为励磁电压 Vt，在曲线上选择 n 个点，将各点对应的 ifd1、ifd2、…、ifdn 和 Vt1、Vt2、…、Vtn 依次输入对话框中即可。如果不需要考虑铁心的饱和，就不要选中该项，这时铁心按线性考虑。

通过同步电机模型的测量端 m 可以观测电机模型的 16 项参数，它们分别为：

(1) 1～3 是定子电流 isa、isb、isc。

(2) 4～5 是 q 轴和 d 轴定子电流 isq、isd。

(3) 6～8 是磁场和阻尼绕组电流 ifd、ikq、ikd。

(4) 9～10 是 q 轴和 d 轴磁链 φmq、φmd。

(5) 11～12 是 q 轴和 d 轴电压分量 Vq、Vd。

(6) 13 是转子角 Δθ，即功率角 δ。

(7) 14 是转子角速度 ω。

(8) 15 是电功率 Pe。

(9) 16 是转子速度偏差 dω。

4.3.4 交流电机测量单元

交流电机测量单元（图标见图 4-24）用于观测交流电机的工作情况。在交流电机的模型图标上都有一个测量端 m，通过该端可以输出交流电机模型各变量，如电压、电流、转速、磁链等的数据，这些数据以多维矢量的形式表示，在使用中，需要将需观测的变量数据从多维矢量中分列出来，交流电机测量单

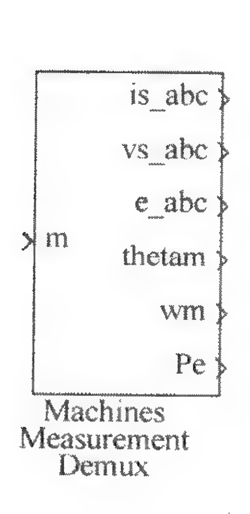


图 4-24 交流电机测量单元图标

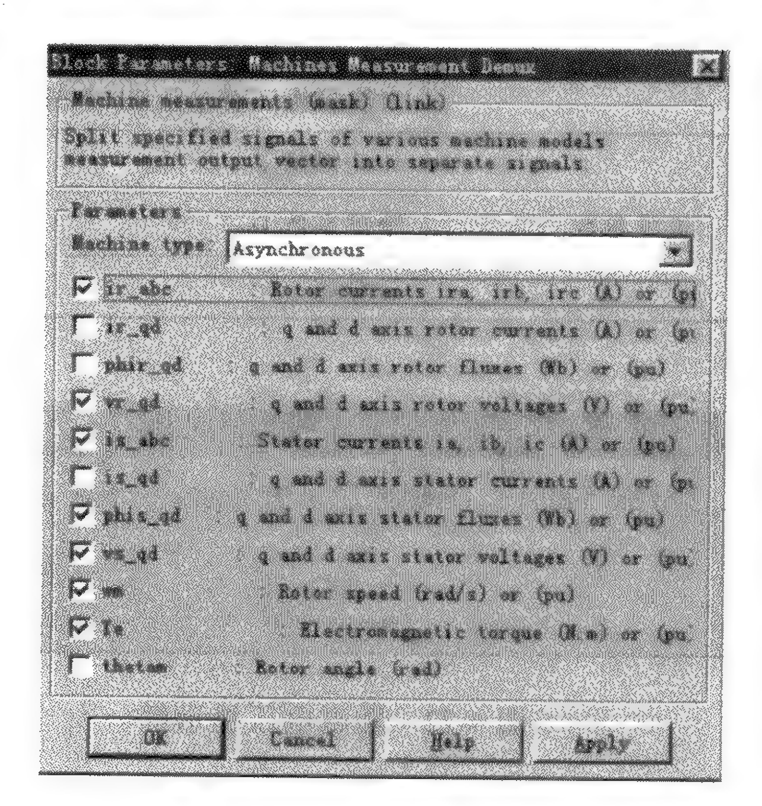


图 4-25 交流电机测量单元对话框

元的作用就是用于分列需观测的变量数据。交流电机测量单元是一个通用单元，它可以用于测量交流同步电机也可以用于测量异步电机。在使用时，只要将电机模块的测量输出端 m 与测量单元的输入端 m 连接起来即可。双击测量单元模块，则弹出模块对话框（见图 4-25），在对话框的电机类型栏中选择需要观测的电机后，在该栏下方即会出现这种电机可观测的各项变量，可以根据需要点击各项变量前的空白格，则完成了需观测量的选择。观测变量一般可以使用示波器。如果电机模型使用的是国际单位制，则输出变量的也是使用国际单位制，如果电机模型使用的是标幺值，则输出变量使用的也是标幺值。

第5章　电力电子变流电路的仿真

电能是现代工农业、交通运输、通信和人们日常生活不可缺少的能源。电能一般分为直流电和交流电两大类，现代科学技术的发展使人们对电能的要求越来越高，不仅需要将交流电转变为直流电，直流电转变为交流电，以满足供电电源与用电设备之间的匹配关系，还需要通过对电压、电流、频率、功率因素和谐波等的控制和调节，以提高供电的质量和满足各种各样的用电要求，这些要求在电力电子技术出现之前是不可能实现的。随着现代电力电子技术的发展，各种新型电力电子器件的研究、开发和应用，使人们可以用电力电子变流技术为各种各样的用电要求提供高品质的电源，提高产品的质量和性能，提高生产效率，改善人们的生活环境。将来从电网得到的工频电能大部分都需要经过电力电子装置的二次变换处理，电力电子的应用领域将越来越广阔。

所谓变流就是指交流电和直流电之间的转换，对交直流电压、电流的调节，和对交流电的频率、相数、相位的变换和控制。而电力电子变流电路就是应用电力电子器件实现这些转换的线路，一般这些电路可以分为四大类。

(1) 交流-直流变流器。

(2) 直流-直流斩波调压器。

(3) 直流-交流变流器。

(4) 交流-交流变流器，其中，又分为交流调压器和交-交变频器。

运用现代仿真技术是学习、研究和设计电力电子变流电路的高效便捷的方法。

5.1　交流-直流变流器

交流-直流变流器又称整流器、AC-DC 变流器，其作用是将交流电转变为直流电，一般也称整流，并且在整流的同时还对直流电压电流进行调节，以符合用电设备的要求。常用的整流器有单相和三相整流器，从控制角度区分，有不控、半控和全控整流电路之分，从输出直流的波形来区分，又有半波和全波整流之分。二极管、晶闸管是常用的整流器件，现在采用全控型器件的 PWM 方式整流器也越来越多。整流电路的仿真可以用 powersys 模型库中的二极管和晶闸管等模块来构建，对三相整流电路模型库中有 6-pulse diode bridge、6-pulse thyristor bridge、universal bridge 等模块可以调用，使用这些模块可以使仿真更方便。复杂

的大功率多相整流器可以在三相桥的基础上构建。这里主要介绍常用的单相和三相的相控整流电路的仿真。

5.1.1 单相桥式全控整流电路仿真

单相桥式全控整流电路如图 5-1 所示，电路由交流电源 u_1、整流变压器 T、晶闸管 VT1 ~ VT4 、负载电阻 R 以及触发电路组成。在变压器二次电压 u_2 的正半周触发晶闸管 VT1 和 VT3，在 u_2 的负半周触发晶闸管 VT2 和 VT4，在负载上可以得到方向不变的直流电，改变晶闸管的控制角可以调节输出直流电压和电流的大小。该电路的仿真过程可以分为建立仿真模型（或称为绘制仿真电路），设置模型参数和观测仿真结果等几个主要阶段，现分步叙述如下。

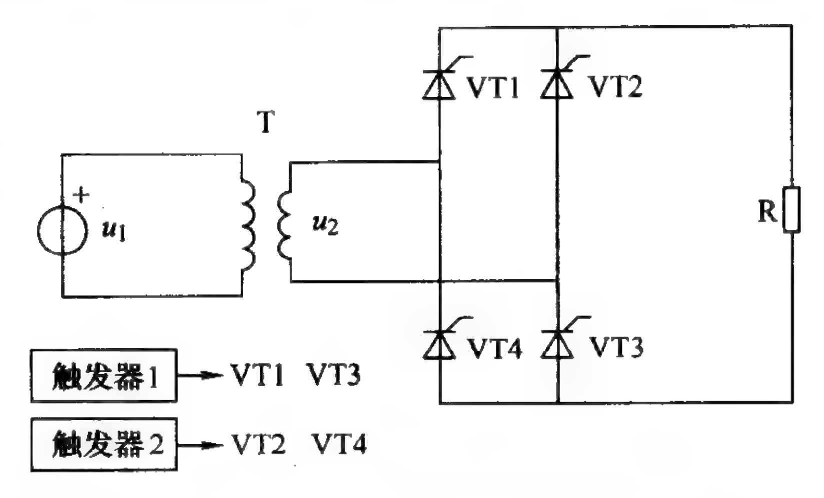


图 5-1 单相桥式全控整流原理电路

1. 建立仿真模型

（1）首先建立一个仿真模型的新文件。在 MATLAB 的菜单栏上点击 File，选择 New，再在弹出菜单中选择 Model，这时出现一个空白的仿真平台，在这平台上可以绘制电路的仿真模型。同时也可以在 File 菜单下给文件命名，在本例的文件名为 rectifier1。

（2）提取电路元器件模块。在仿真模型窗口的菜单栏上点击■图标调出模型库浏览器，在模型库中提取适合的模块放到仿真平台上（见图 5-2）。组成单相桥式整流电路的主要元器件有交流电源、晶闸管、RLC 负载等，提取元器件模块的路径见表 5-1。

表 5-1 元器件名称及路径

元器件名称	提取元器件路径
交流电源 u_2	Power system blockset/electrical sources/AC voltage source
晶闸管 VT1 ~ VT4	Power system blockset/power electronics/thyristor
RLC 串联电路	Power system blockset/elements/series RLC branch
脉冲发生发生器	Simulink/sources/pulse generator
T 形节点	Power system blockset/connectors/T connector
中性节点	Power system blockset/connectors/neutral（output）

（3）将电路元器件模块按单相整流的原理图连接起来组成仿真电路。首先

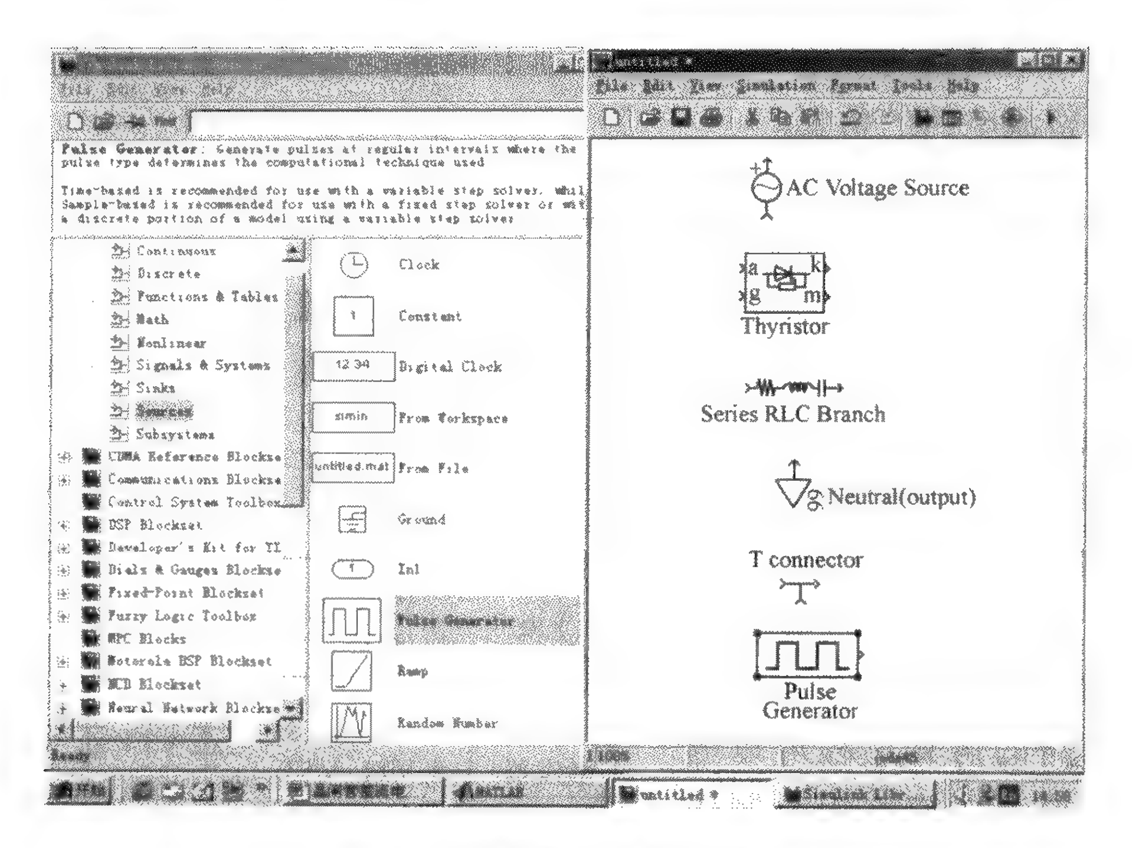


图 5-2　提取整流电路元器件

将元器件移动到合适的位置，将光标箭头指向需移动的元器件，按住鼠标左键将元器件移动到指定位置。单相桥需要 4 个晶闸管模块，这可以使用模块的复制办法，以鼠标左键单击晶闸管模型图标，模型图标的四角出现四个小黑块（■），表明该模块已被选中，这时同时按住键盘中的 Ctrl 键以及鼠标的左键，移动鼠标则可以将晶闸管模块复制到其他位置。同时点击元器件模块的名称可以修改模块的名称，如将 thyristor 改名为 VT1 等。

连接模块只需要以光标移向模块的输出端，以左键点住并移动鼠标即可拖拉出一条连线，将连线拉到另一元器件的输入端，松开鼠标即完成一条接线。在本例中，需要将电源 AC 的输出端和晶闸管模块 VT4 的输出端 k，同时连接晶闸管模块 VT1 的输入端 a，这需要使用 T 形接头，同样 VT2 的输入端 a 与 VT3 的输出端 k 和电源的负极端的连接也要使用 T 形接头。为了连接 T 形接头 T2 与交流电源负极的两个输入端，使用了中性节点（Neutral output）。

在 SIMULINK 模型库中没有专门的单相桥式整流器触发模型，这里使用了两个脉冲发生器来分别产生 VT1 和 VT3 、VT2 和 VT4 的触发脉冲。整流器的负载选用了 RLC 串联电路，可以通过参数设置来改变电阻、电感和电容的组合。连接完成的单相桥式整流电路模型如图 5-3 所示，为了简化仿真过程，在本例中省略了整流变压器。

模型中使用了两种测量仪器，示波器（Scope）和多路测量器（Multimeter）。示波器可以观测它连接点上的波形，多路测量器（Multimeter）可以接收一些模块发送出来的参数信号并通过示波器观测，接上观测器后的仿真电路如图 5-4 所

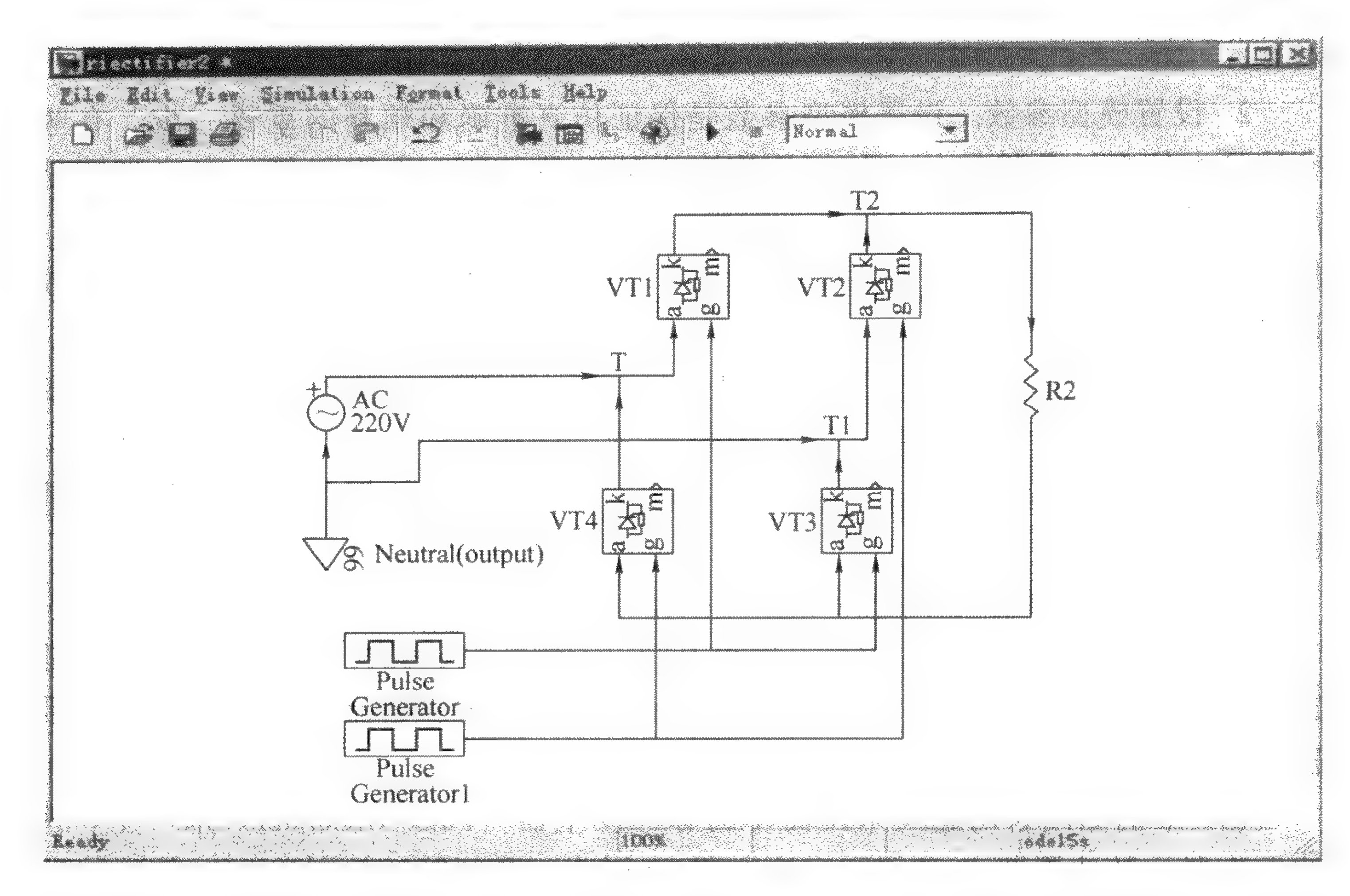


图 5-3　单相桥式整流电路模型

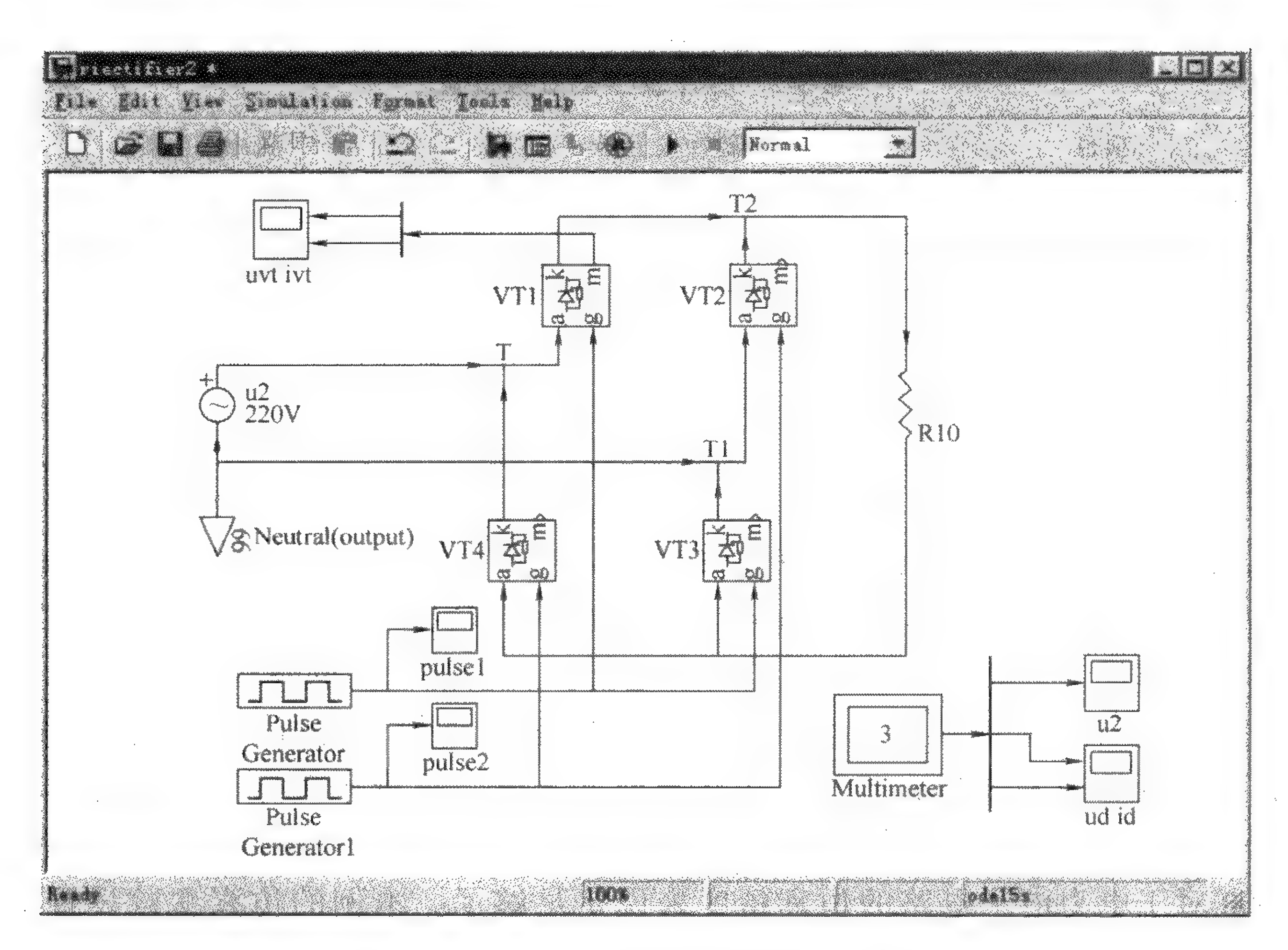


图 5-4　连接了示波器的单相整流电路模型

示。

2. 设置模型参数。设置模型参数是保证仿真准确和顺利的重要一步，有些参数是由仿真任务规定的，如本例仿真中的电源电压、电阻值等，有些参数是需要通过仿真来确定的。设置模型参数可以双击模块图标弹出参数设置对话框，然后按框中提示输入，若有不清楚的地方可以借助 Help 帮助。在本例中，参数设置如下：

（1）交流电压源 u2，（即图 5-4 中 u2）电压为 220V，频率为 50Hz，初始相位为 0°。在电压设置中要输入的是电压峰值，在该栏中键入“220 × sqrt（2）”。在对话框最后的测量选择选中电压“voltage,”这样，u2 数据可以送入多路测量器（Multimeter）。

（2）晶闸管 VT1 ~ VT4 直接使用了模型的默认参数，也可以另外设置。

（3）负载 RLC，R 的值 2Ω，L 的值 0，C 的值为 inf，并在参数页最后的测量选择中选择，“voltage and current”，这样负载 R 的电压和电流可以通过多路测量器（Multimeter）观测。

（4）本例晶闸管的触发采用简单的脉冲发生器（Pulse Generator）来产生，脉冲发生器的脉冲周期 T 必须和交流电源 u2 同步。晶闸管的控制角 α 以脉冲的延迟时间 t 来表示，$t = \alpha T/360°$，其中，α 为控制角，$T = 1/f$，f 为交流电源频率。本例在 $\alpha = 30°$时的脉冲发生器参数设置见表 5-2。

表 5-2　脉冲发生器参数设置

项目	脉冲发生器 1	脉冲发生器 2
脉冲类型（Pulse type）	Time-based	Time-based
脉冲幅值（Amplitude）	1	1
周期（Period）	0.02s	0.02s
脉冲宽度（Pulse width）	0.0005s	0.0005s
相位延迟（Phase delay）	0.00167s	0.01167s

3. 模型仿真

在模型开始仿真前还必须首先设置仿真参数。在菜单中选择 Simulation，在下拉菜单中选择 Simulation parameters，在弹出的对话框中可设置的项目很多，主要有开始时间、终止时间、仿真类型（包括步长和解电路的数值方法），以及相对误差、绝对误差等。步长、解法和误差的选择对仿真运行的速度影响很大，步长太大计算容易发散，步长太小运算时间太长，在难于确定时一般可选可变步长（variable - step），仿真数值计算方法可选 ode15、ode23、ode45 等，误差选择 1/1000 对于电力电子电路的仿真精度来说是足够了。本例的仿真参数设置如图 5-5 所示。

在参数设置完毕后即可开始仿真。在菜单 Simulation 下选择 Start，或直接点

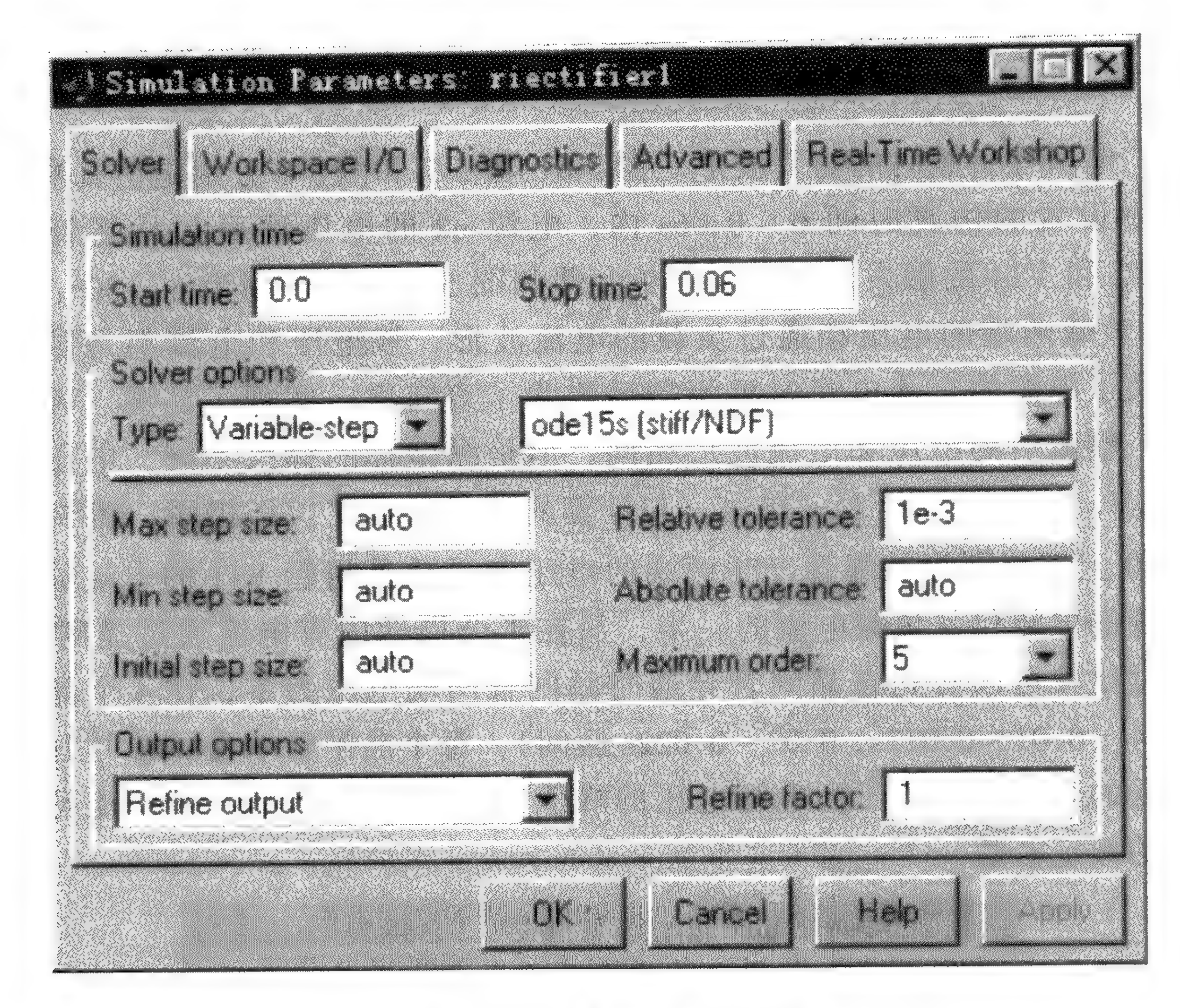


图 5-5　仿真参数设置对话框

击工具栏上的“▶”图标仿真立即开始，在屏幕下方的状态栏上可以看到仿真的进程。若要中途停止仿真可以选择 Stop 或工具栏上的“■”图标。

在仿真计算完成后即可以通过示波器来观察仿真的结果。我们已经在需要

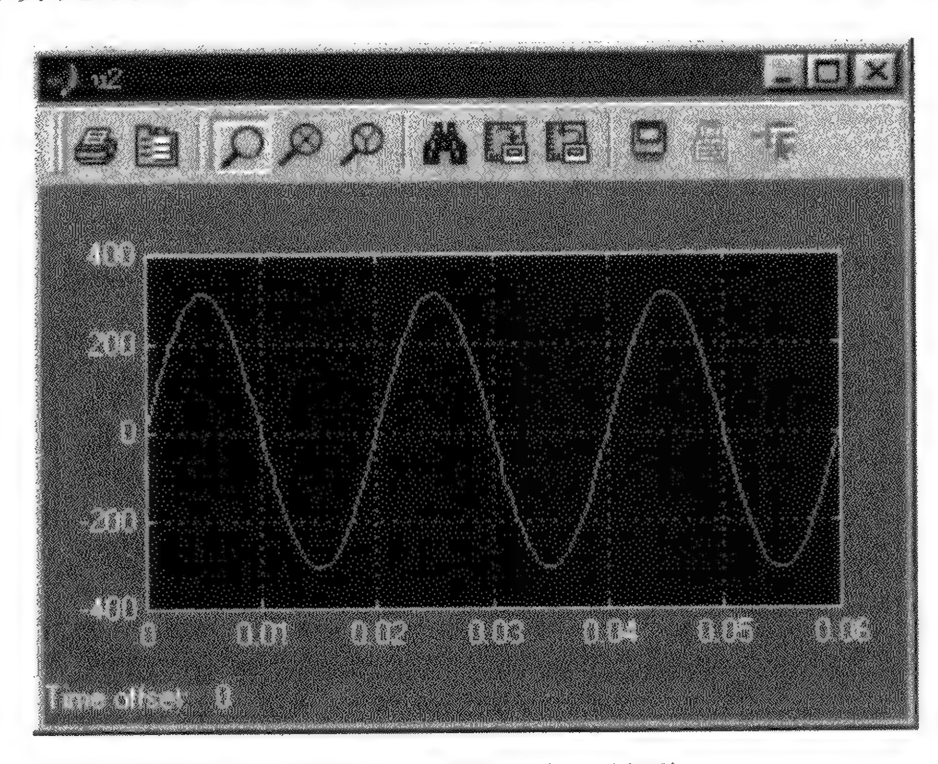


图 5-6　电源电压 u2 波形

观测的点上放置了示波器，双击示波器图标，即可弹出示波器窗口显示输出波形。

（1）电阻性负载时的仿真波形。图 5-6、图 5-7 和图 5-8 分别是仿真参数设置对话框中设置的仿真时间 0 ~ 0.06s 内，电源 u2 的电压波形和晶闸管 VT1 和 VT3、VT2 和 VT4 的触发脉冲。图 5-9 上部和图 5-9 下部分别为 $\alpha = 30°$、R 的值为 2Ω 时负载两端的电压和通过负载的电流波形，该电压和电流都是脉动的直流，反映了电源的交流电经过整流器后成为了直流电，实现了整流。因为是电阻负载，整流后的电压和电流波形相同，但是纵坐标的标尺不同，电压的幅值 $U_m = 311V$，电流的幅值 $I_m = 155A$，与计算的结果 $I_m = U_m/R$ 相同。图 5-10 下部和图 5-10 上部分别为晶闸管 VT1 两端的电压和通过晶闸管 VT1 的电流波形，通过晶闸管的电流仅是负载电流的一半，只在半个周期内有电流通过晶闸管 VT1。并且通过比较可以看到在晶闸管导通时晶闸管两端电压为零，在 4 个晶闸管都不导通时（0.01 ~ 0.012s，0.02 ~ 0.022s 区间），每个晶闸管承受 u2/2 电压，且晶闸管承受的最高反向电压为电源电压的峰值 311V，根据该电压和电流可以选择晶闸管的额定参数。

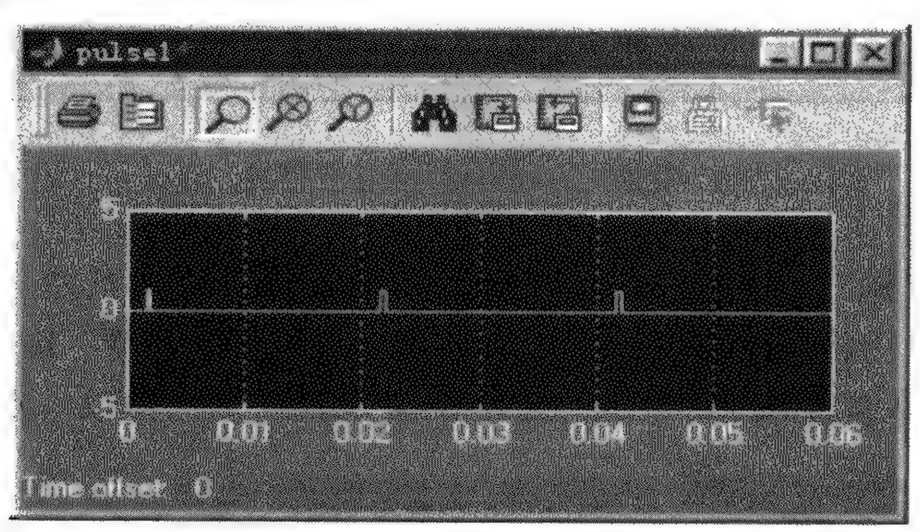


图 5-7　晶闸管 VT1 和 VT3 的触发脉冲

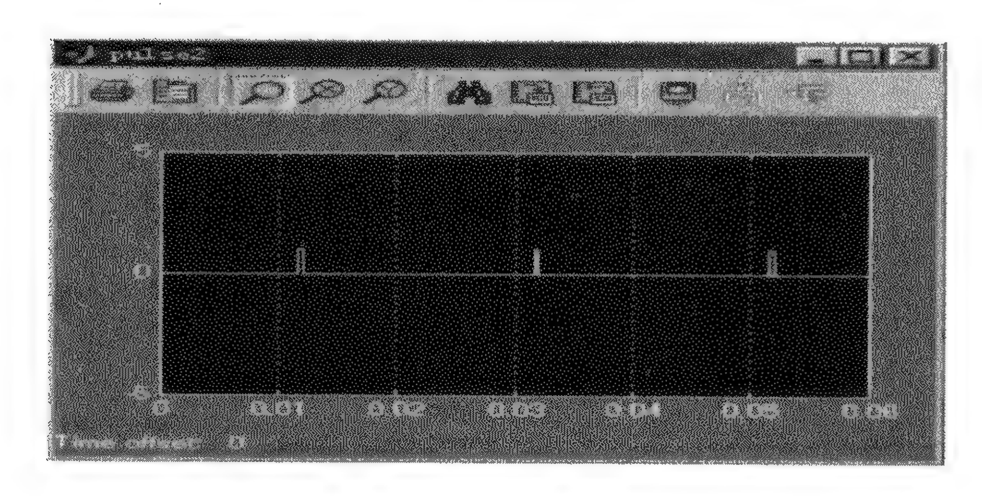


图 5-8　晶闸管 VT2 和 VT4 的触发脉冲

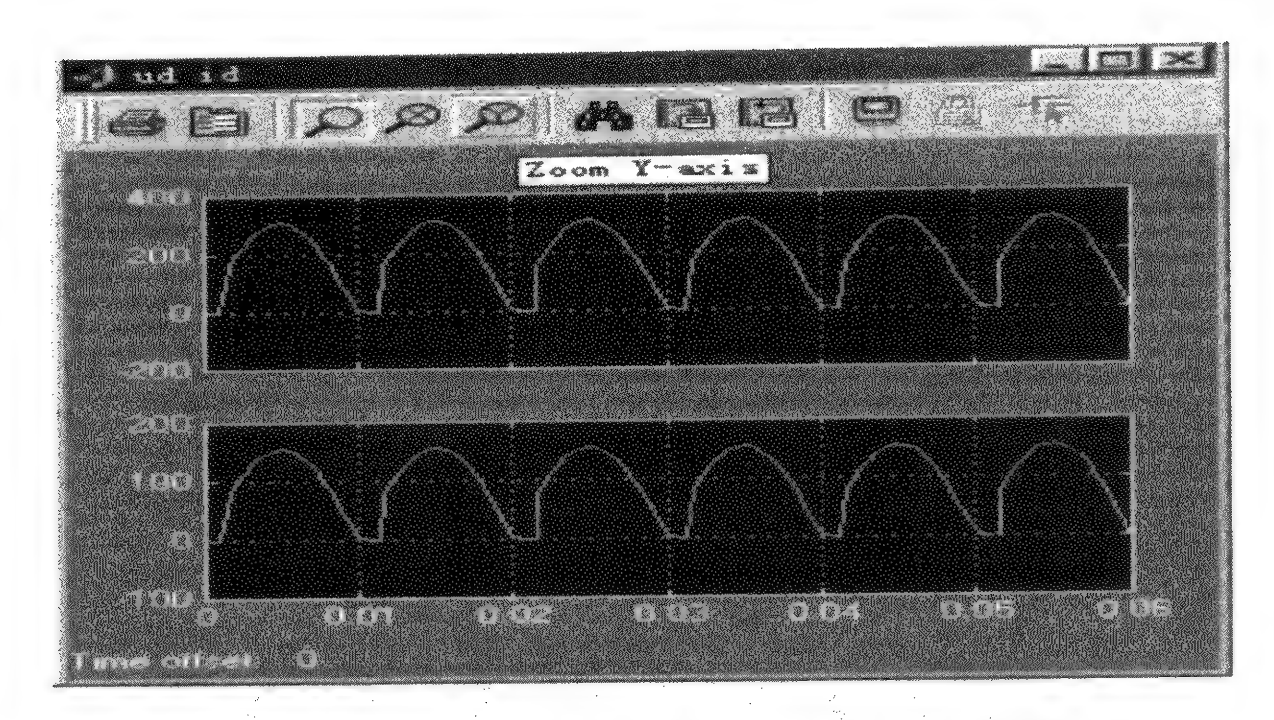


图 5-9　$\alpha = 30°$时负载电阻两端的电压波形和电流波形

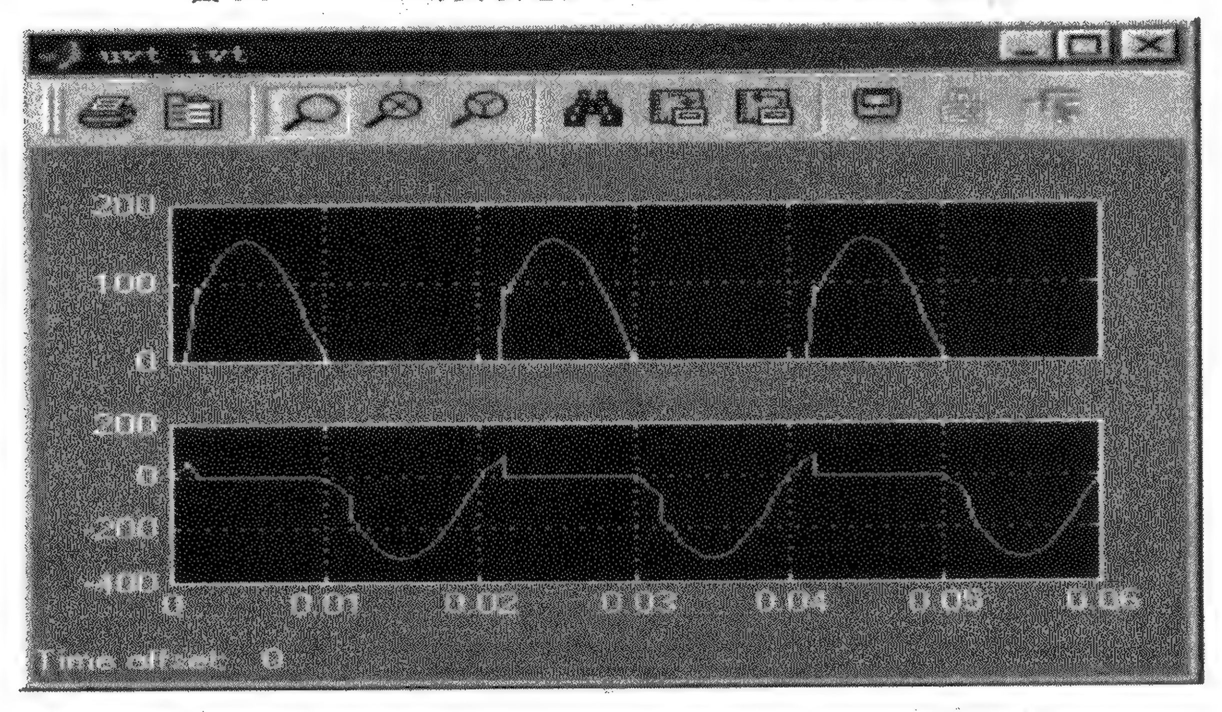


图 5-10　$\alpha = 30°$时晶闸管的电流波形和晶闸管的电压波形

如果要观察在其他控制角下，整流器的工作情况，只需修改脉冲触发器的延迟时间，重新启动仿真即可。图 5-11 上部和下部分别为 $\alpha = 60°$时负载电阻两端的电压和通过负载的电流波形。图 5-12 下部和上部分别为 $\alpha = 60°$时晶闸管 VT1 两端的电压和通过晶闸管 VT1 的电流波形。

（2）电阻电感（RL）负载时的仿真。如果要研究电感性负载时整流器的工作情况，只需重新设置负载参数。设 RL 负载，R 的值为 2Ω，L 的值为 0.01H，再次启动仿真，得到图 5-13 和图 5-14 所示的波形。如图所见，电感中电流在启动时，有一上升过程（图 5-13 下部），一个周期后进入稳态，电流是连续的，对应的电压波形出现负半周（图 5-13 上部），使整流平均电压较纯电阻负载时减小。

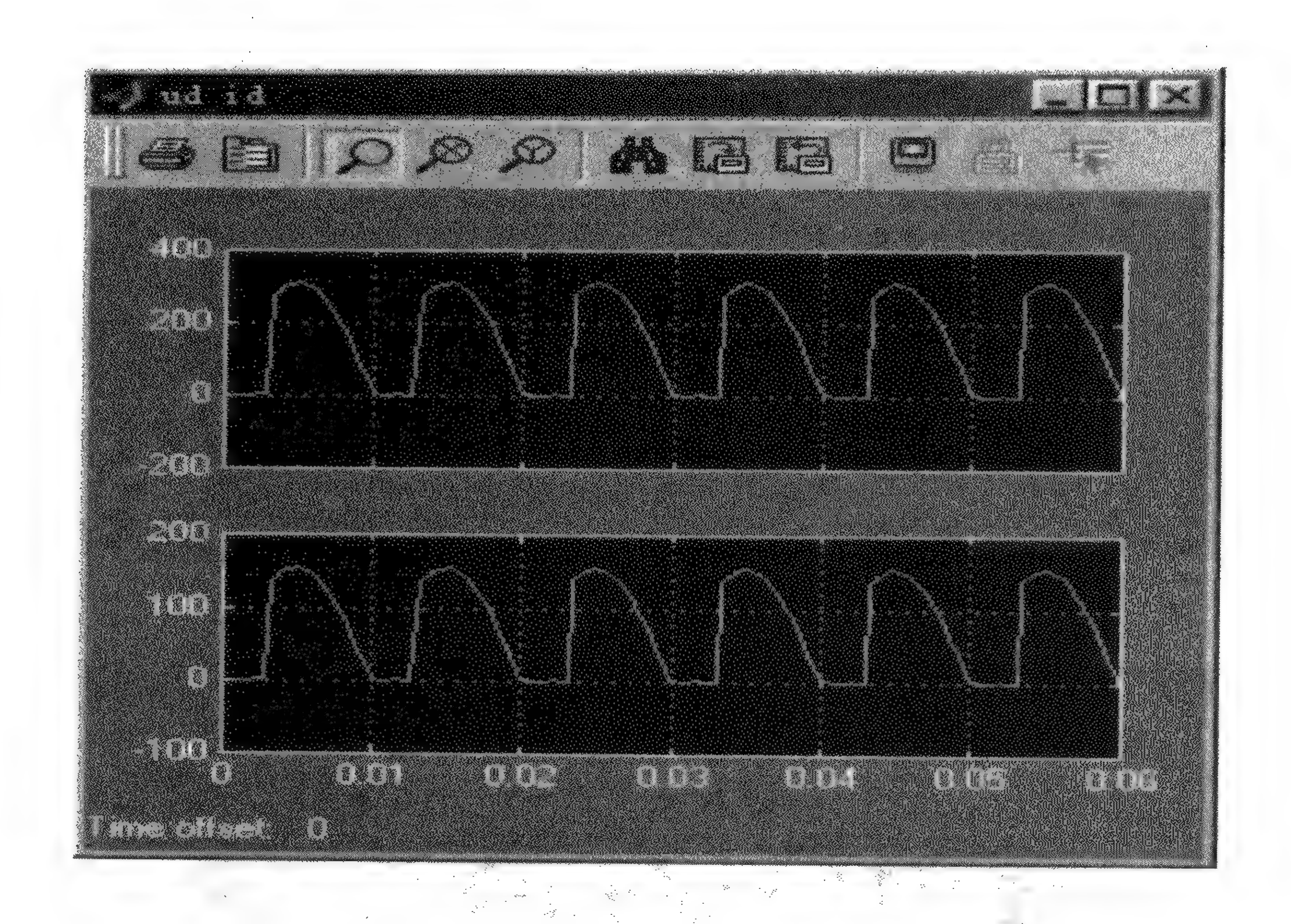


图 5-11　$\alpha=60°$时负载电阻两端的电压波形和电流波形

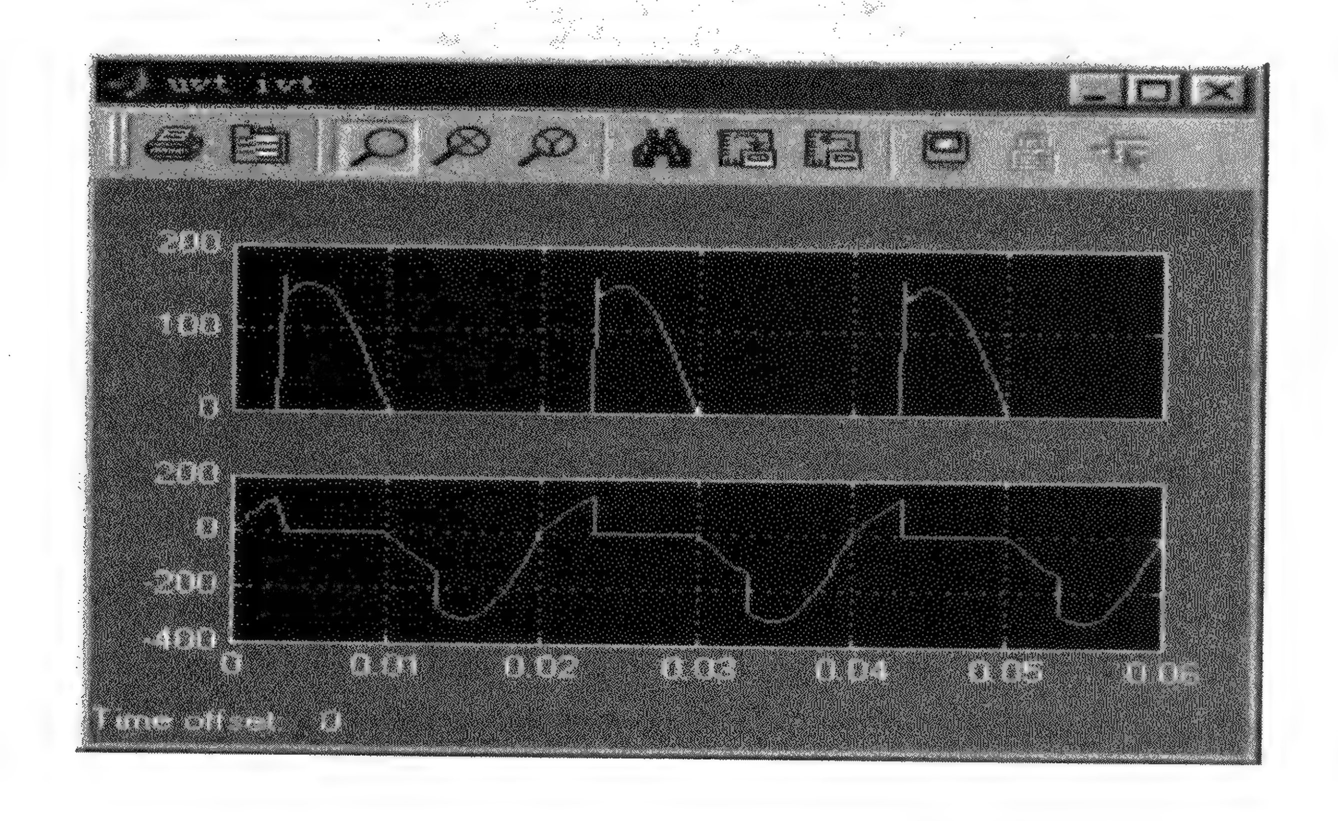


图 5-12　$\alpha=60°$时晶闸管的电流波形和电压波形

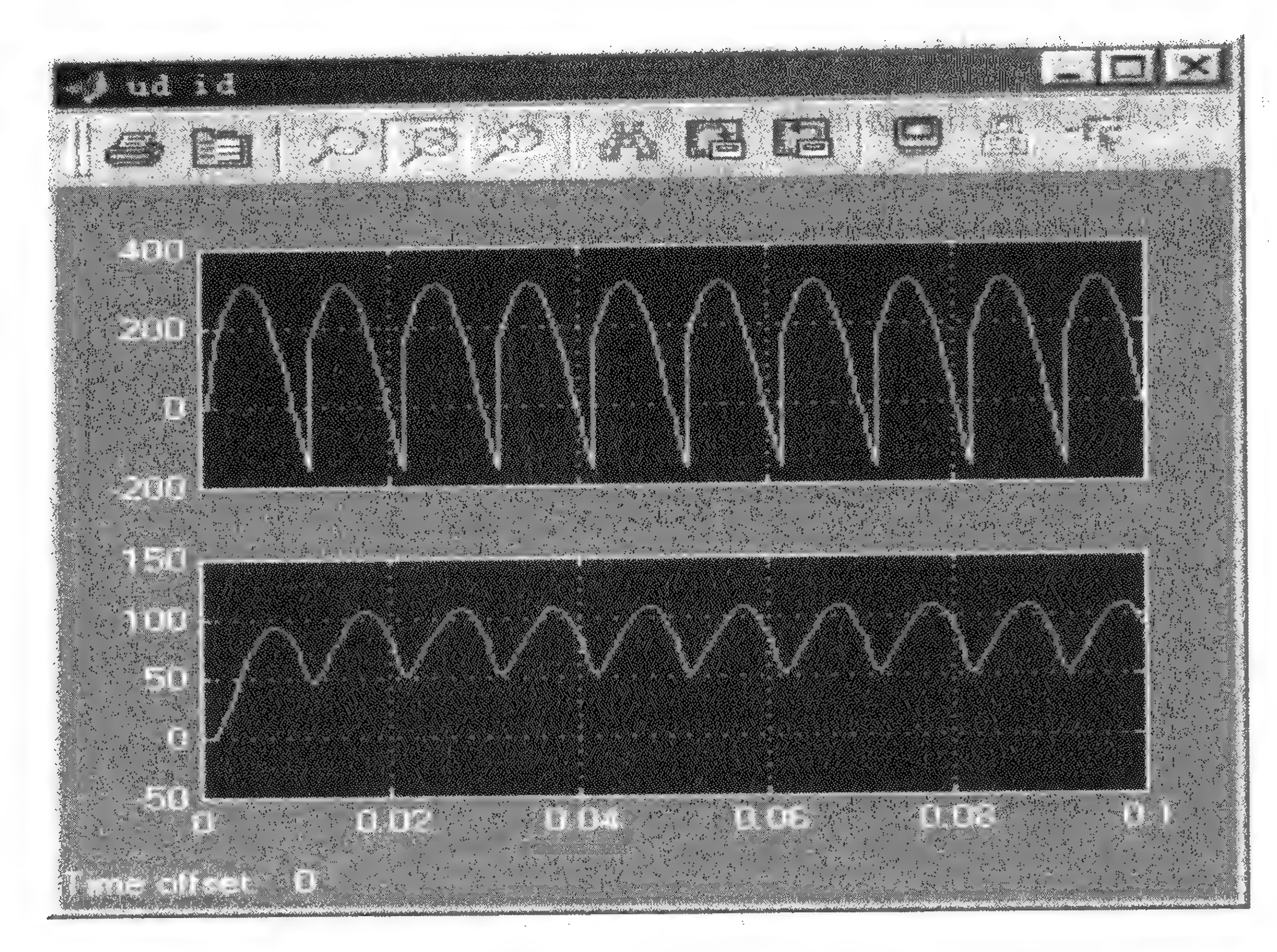


图 5-13　$\alpha=60°$时电感负载整流器输出电压波形和电流波形

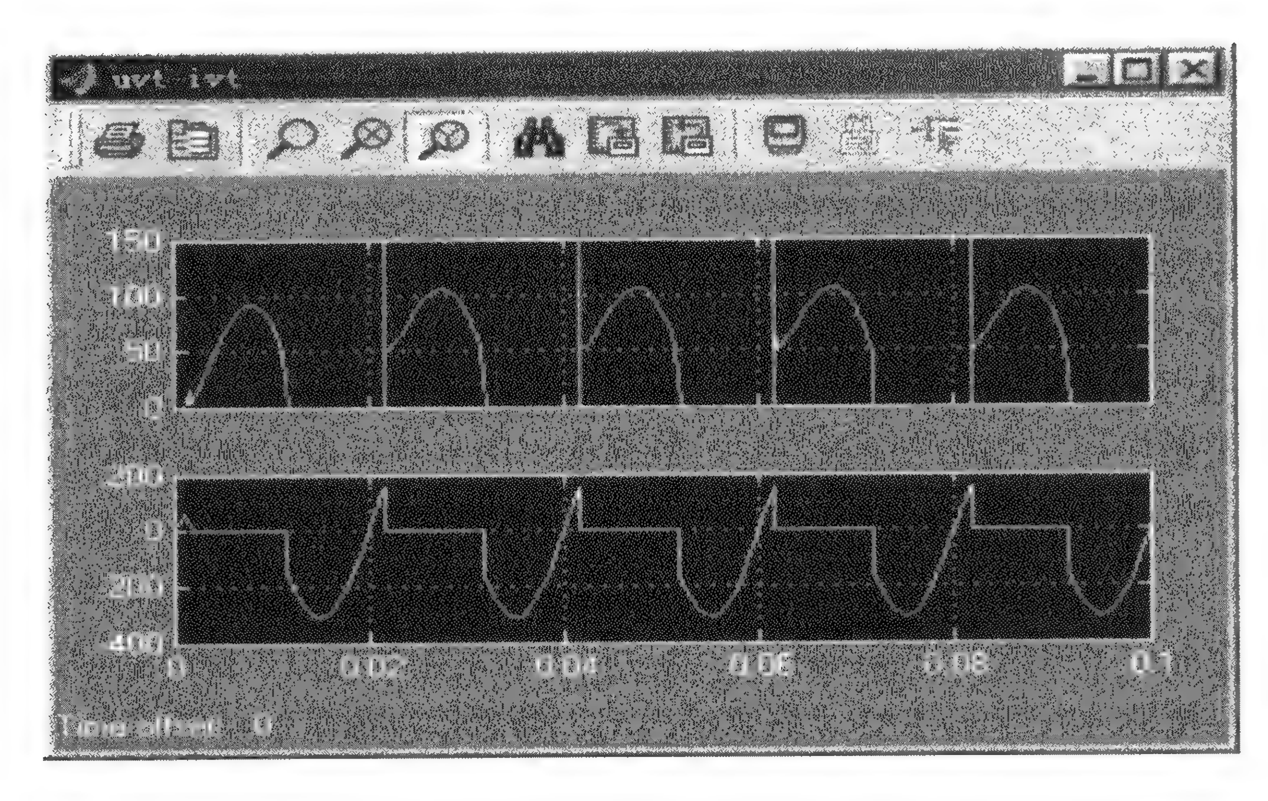


图 5-14　$\alpha=60°$时电感负载整流器晶闸管的电流波形和电压波形

5.1.2　三相桥式全控整流电路仿真

三相桥式全控整流电路是应用最广泛的整流电路，完整的三相桥式全控整流电路由整流变压器、6 个桥式连接的晶闸管、负载、触发器和同步环节组成

(见图 5-15)。6 个晶闸管以次相隔 60°触发，将电源交流电整流为直流电。三相桥式整流电路必须采用双脉冲触发或宽脉冲触发方式，以保证在每一瞬时都有两个晶闸管同时导通（上桥臂和下桥臂各一个)。整流变压器采用三角形/星形联结是为减少 3 的整倍数次谐波电流对电源的影响。

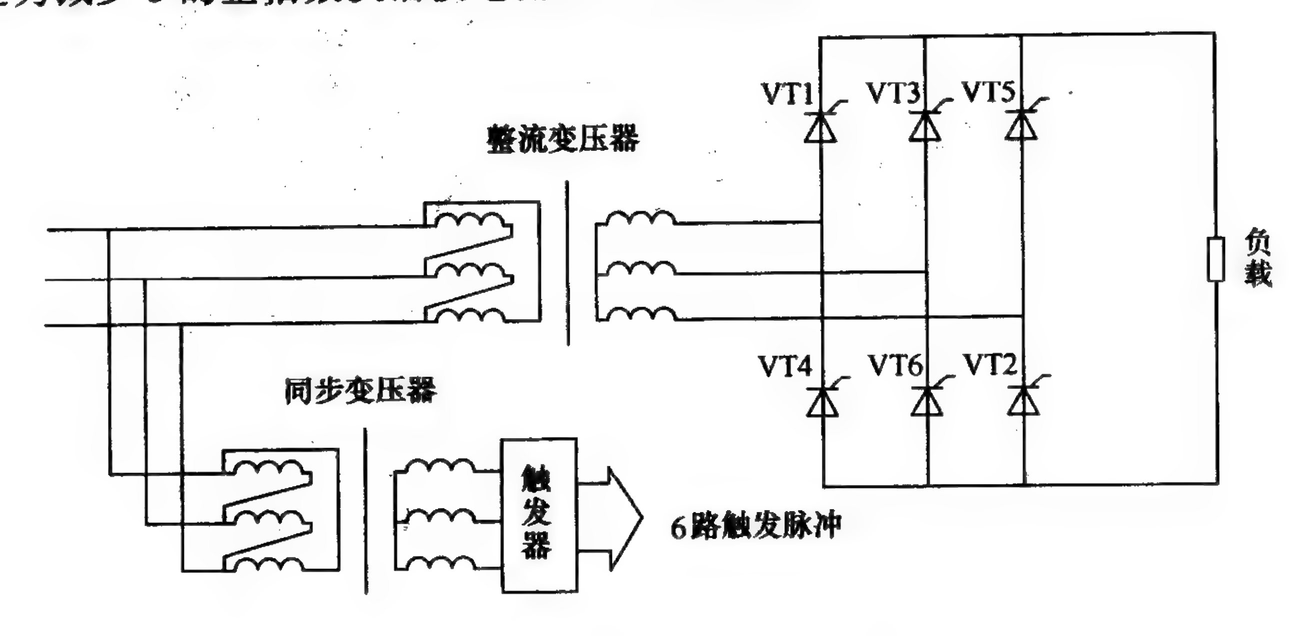


图 5-15　三相桥式全控整流原理电路

三相桥式整流电路的仿真使用 MATLAB 模型库中的三相桥和触发器的集成模块是很方便的。用模型库中元器件组成的三相桥式整流电路的仿真模型如图 5-16 所示。

仿真模型中主要使用的元器件模块和提取路径见表 5-3，在模型的整流变压器和整流桥之间接入了一个三相电压-电流测量单元 V-I 是为观测方便。整流器的输出电压和电流是通过多路测量器测量负载的电压和电流来实现的，当然也可以用电压和电流测量单元直接检测整流器输出单元和电流。在整流器工作中保证触发脉冲与主电路同步很重要，仿真使用的 6 脉冲发生器是在同步电压过零时作为控制角 $\alpha=0°$的位置，因此在整流变压器采用△/Y－11 联结时，同步变压器也可以采用△/Y-11 联结，同步信号的连接如图 5-16 所示。在同步信号关系难以确定时，可以发挥仿真的特点，将三相同步电压信号以不同的顺序连接到 6 脉冲发生器的 AB、BC、CA3 个同步输入端，然后运行该模型，观察整流器输出电压波形，如果电压波形在一周期中 6 个波头连续规则，则该整流器的同步是正确的。负载和控制角可以按需要设定。

【例 5-1】　三相桥式全控整流电路，电源相电压为 220V，整流变压器输出电压为 100V（相电压)，观察整流器在不同负载，不同触发角时整流器输出电压、电流波形，测量其平均值，并观察整流器交流侧电流波形和分析其主要次谐波。

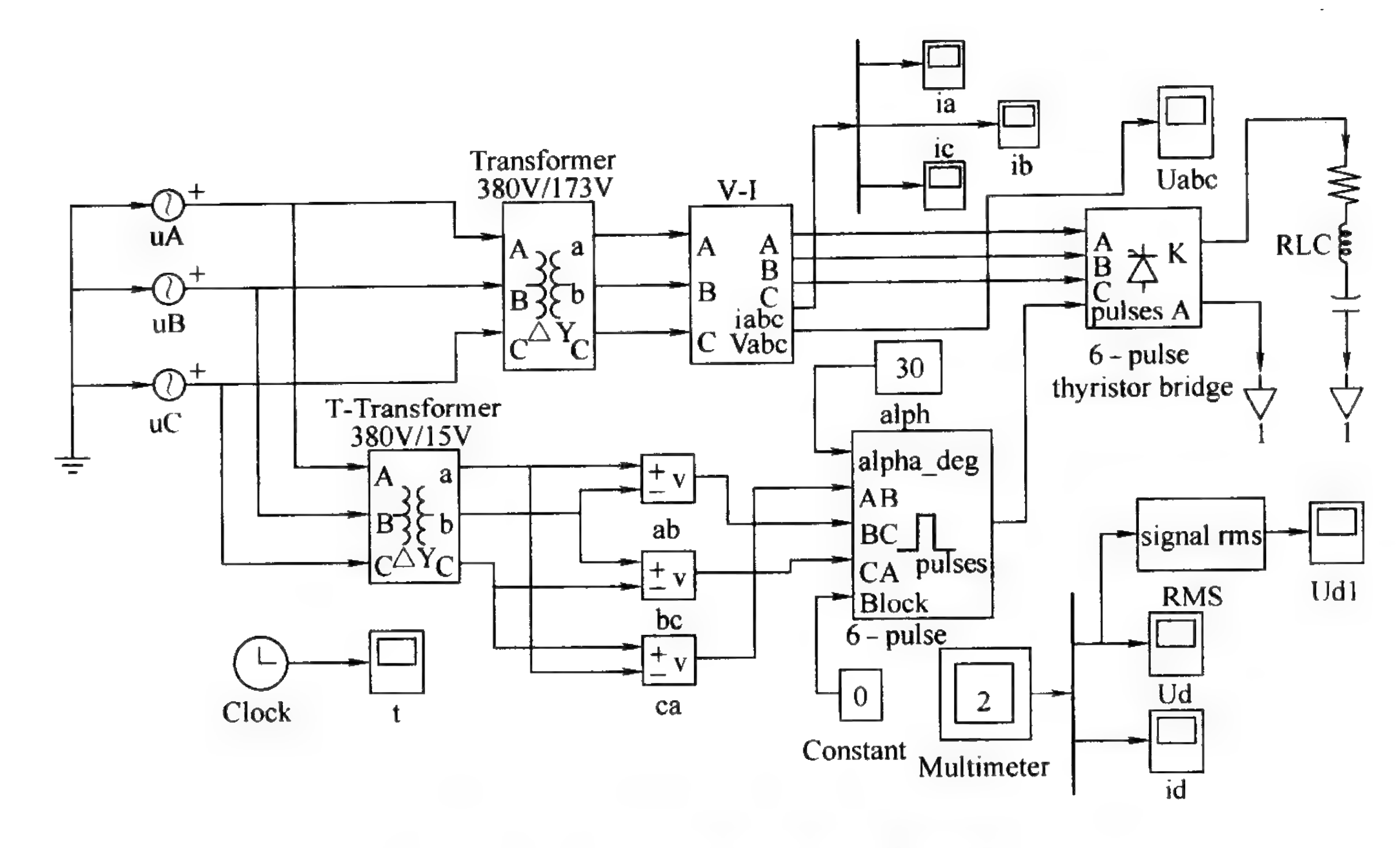


图 5-16 三相桥式整流电路的仿真模型

表 5-3 三相整流电路模型主要元器件

元器件名称	提取元器件路径
交流电源	Electrical sources / AC voltage source
整流变压器（Transformer）	Element/Three-phase transformer（two windings）
同步变压器（T-Transformer）	同上
三相电压-电流测量单元（V－I）	Measurements/ Three-phase V-I measurement
三相晶闸管整流器（6-pulse thyristor bridge）	Extra library/three-phase libary/6-pulse thyristor bridge
RLC 负载	Elements / series RLC branch
6 脉冲发生器（6-pulse）	Extra library/control blocks/synchronized 6-pulse generator
触发角设定（alph）	Simulink/sources/constant
方均根值计算（RMS）	Extra library/ Measurements/RMS

注：因为本例中仅仿真了 $\alpha=30°$波形、这时整流电压只有正半周，所以可以使用方均根值计算模块来记录整流电压的平均值。

1．电阻负载（R 的值为 5Ω、$\alpha=30°$）

（1）设置模型参数如下：

1）电源参数设置：三相电源的电压峰值为 $220V\times\sqrt{2}$，可表示为“220 * sqrt(2)”，频率为 50Hz，相位分别为 0°、－120°、－240°。

2）整流变压器参数设置：一次绕组联结（winding 1 connection）选择 Delta(D11)，线电压为 $=220V\times\sqrt{3}=380V$；二次绕组联结（winding 2 connection）选择

Y，线电压为 $100V \times \sqrt{3} = 173V$，在要求不高时变压器容量、互感等其他参数可以保持默认值不变。

3）同步变压器参数设置：一次绕组联结（winding 1 connection）选择 Delta（D11），线电压为 380V；二次绕组联结（winding 2 connection）选择 Y，线电压为 15V，其他参数可以保持默认值。

4）三相晶闸管整流器参数设置：使用默认值。

5）RLC 负载参数设置：R 的值为 5Ω，L 的值为 0，C 的值为 inf。

6）6 脉冲发生器设置：频率为 50Hz，脉冲宽度取 1°，选择双脉冲触发方式。

7）触发角设置：给定 alph 设置为 30°。

（2）仿真并观察结果。设置的仿真参数如下：仿真时间为 0.06s，数值算法采用 ode15。仿真参数设置完成后即可启动仿真，得到的仿真结果如图 5-17 ~ 图 5-22 所示。将图 5-17 所示的三相电压波形与图 5-18 所示的整流电压（图上部）和电流波形（图下部）相比较，整流后的电压是直流，且波形与三相输入电压波形相对应。整流电压平均值（见图 5-19）与计算值 $U_d = 2.34 \times 100\cos30°V = 202.6V$ 相符。因为是电阻负载，整流后的电压和电流波形相同，但 Y 轴坐标不同。图 5-20 ~ 图 5-22 所示分别为整流器交流侧的电流波形。改变控制角可以观察在不同控制角下整流器的工作情况。

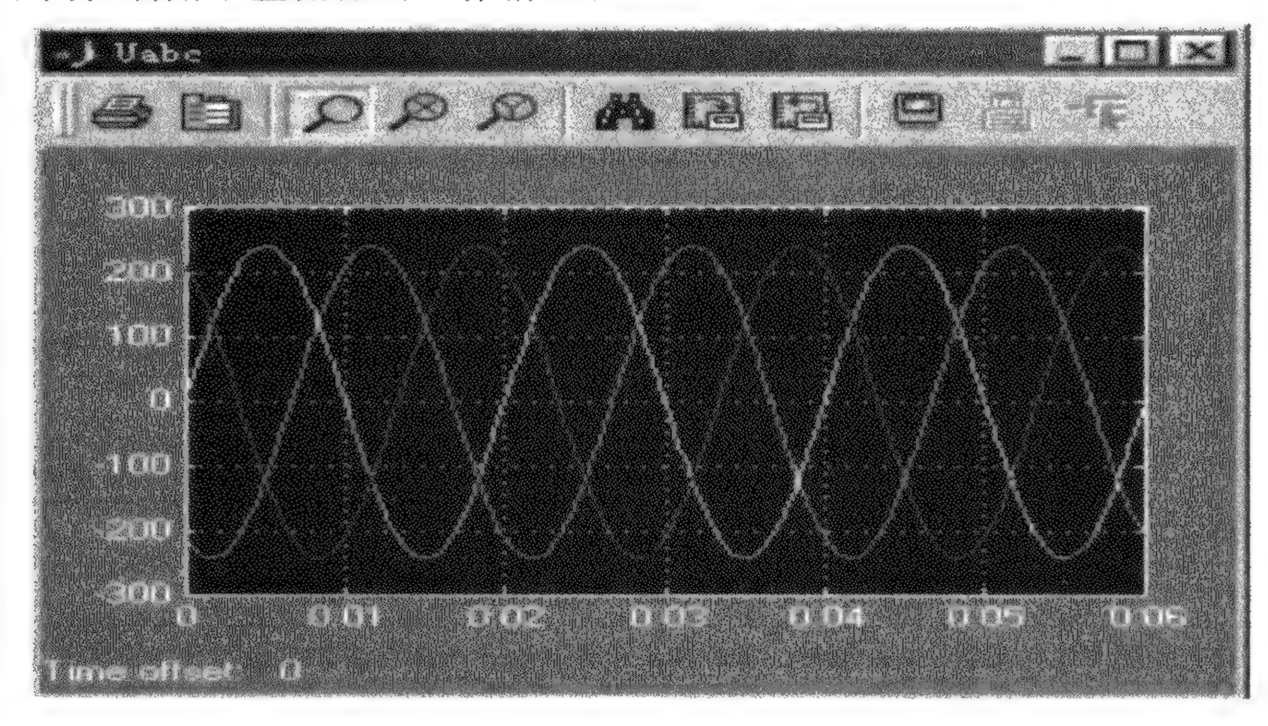


图 5-17　整流器输入的三相线电压波形

2. 电阻电感负载（R 的值为 5Ω、L 的值为 0.01h、$\alpha = 60°$）

在图 5-15 中修改负载 RLC 参数，R 的值为 5Ω，L 的值为 0.01H，C 的值为 inf，同时将触发角设置为 60°。为了观察整流器输入电流和输出电压的谐波，在仿真模型中增加了傅里叶（Fourier）分析模块，修改后的仿真模型如图 5-23 所

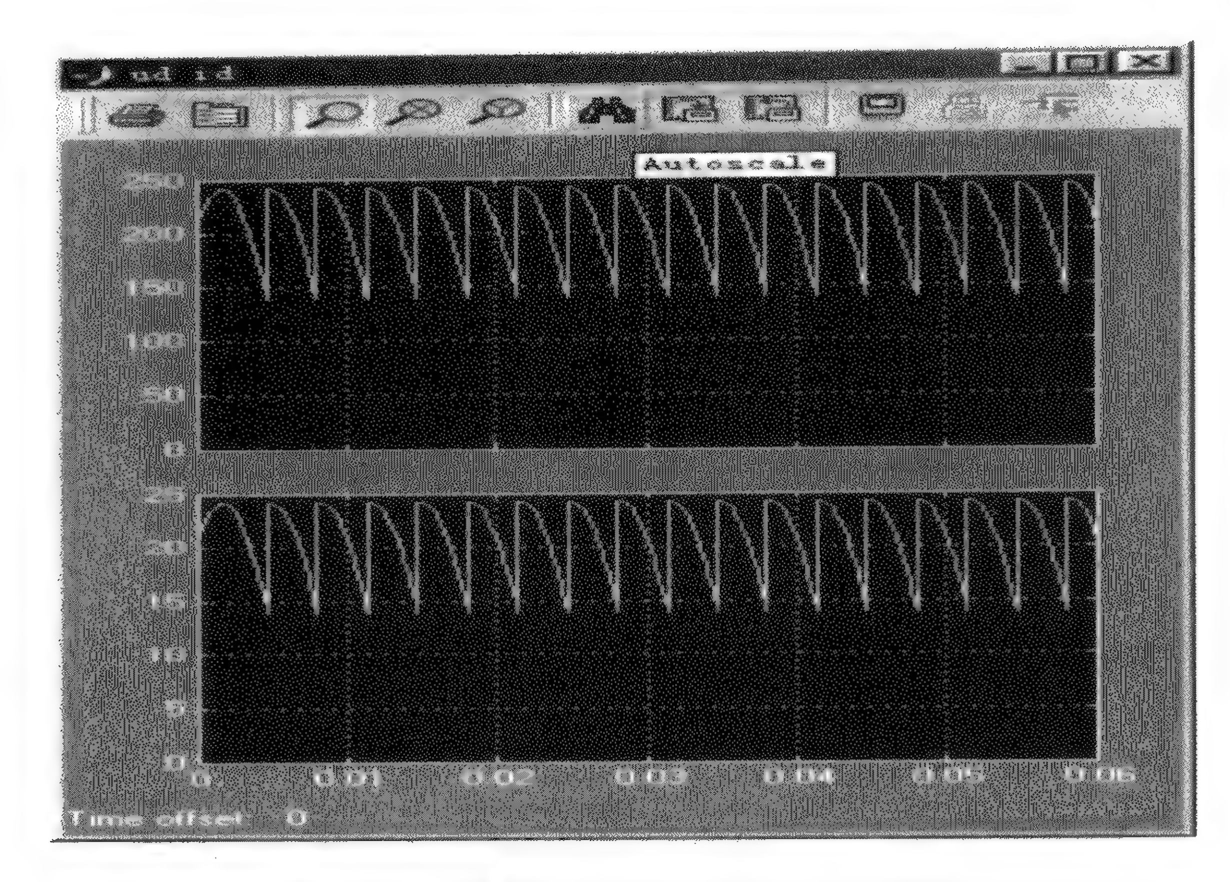


图 5-18　整流器输出的电压波形以及电阻负载时整流器输出的电流波形

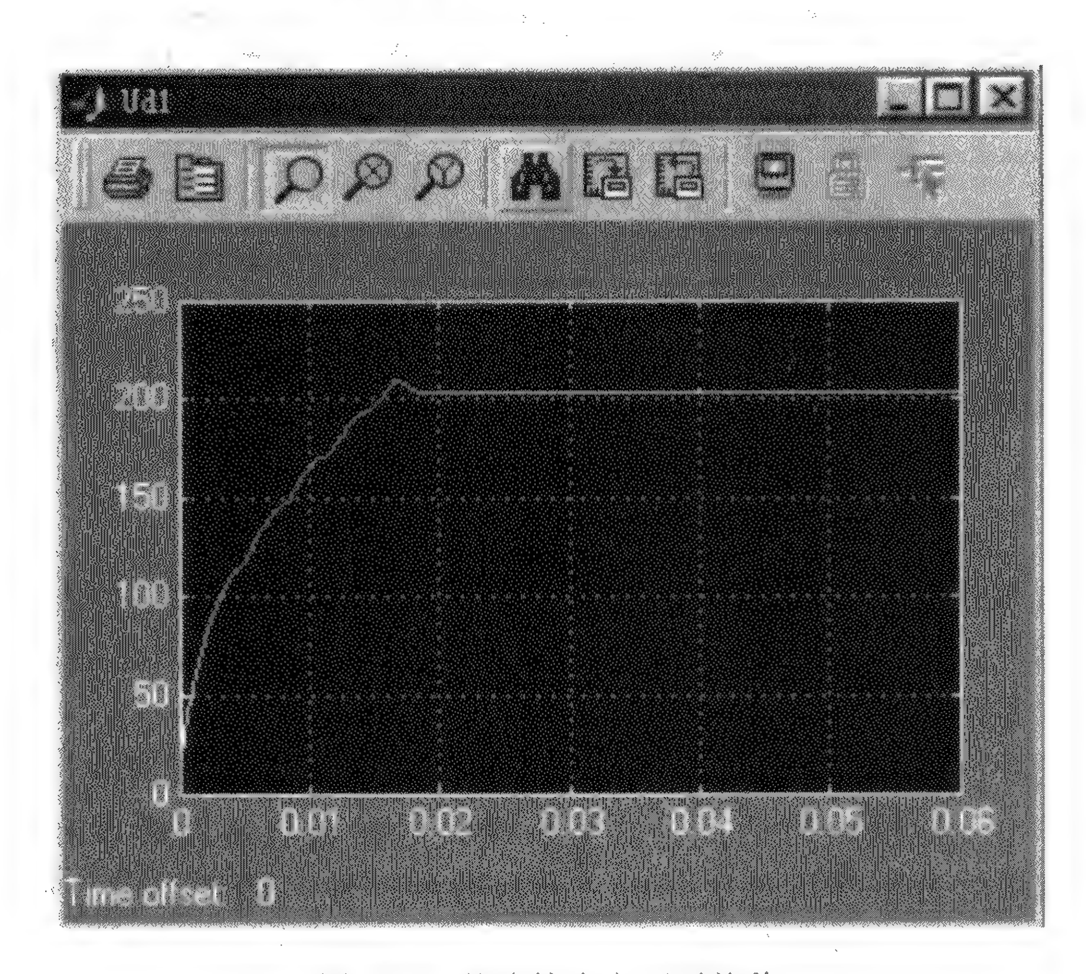


图 5-19　整流输出电压平均值

示。

在仿真参数中设置仿真时间为 0.16s，重新启动仿真，即可得到阻感负载时

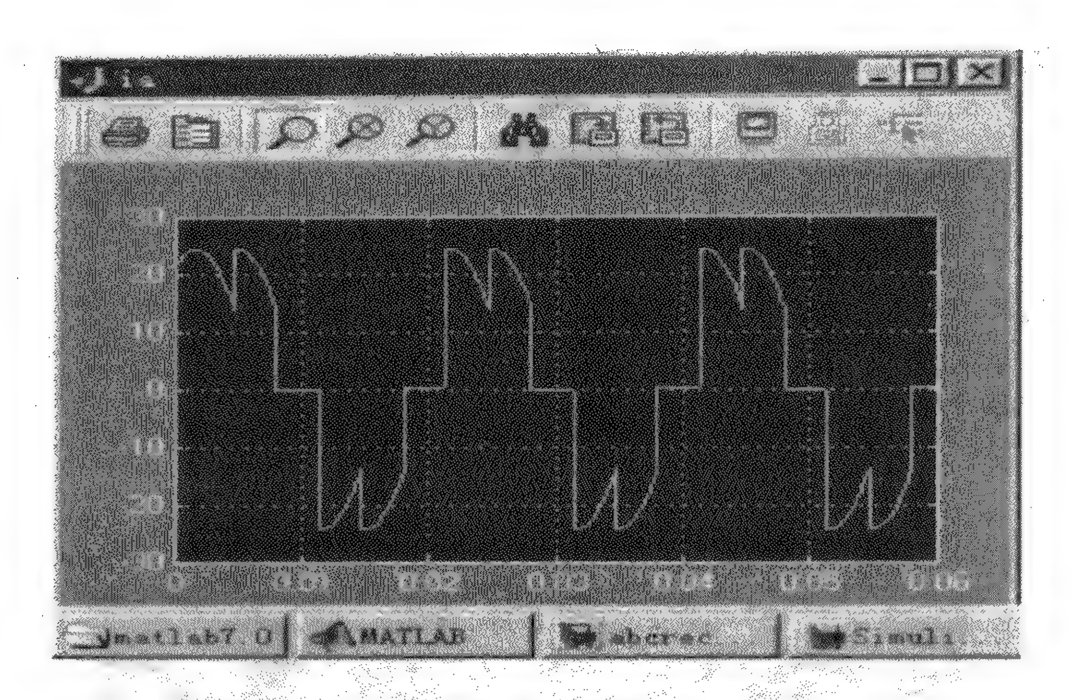


图 5-20　整流变压器二次侧 a 相电流波形

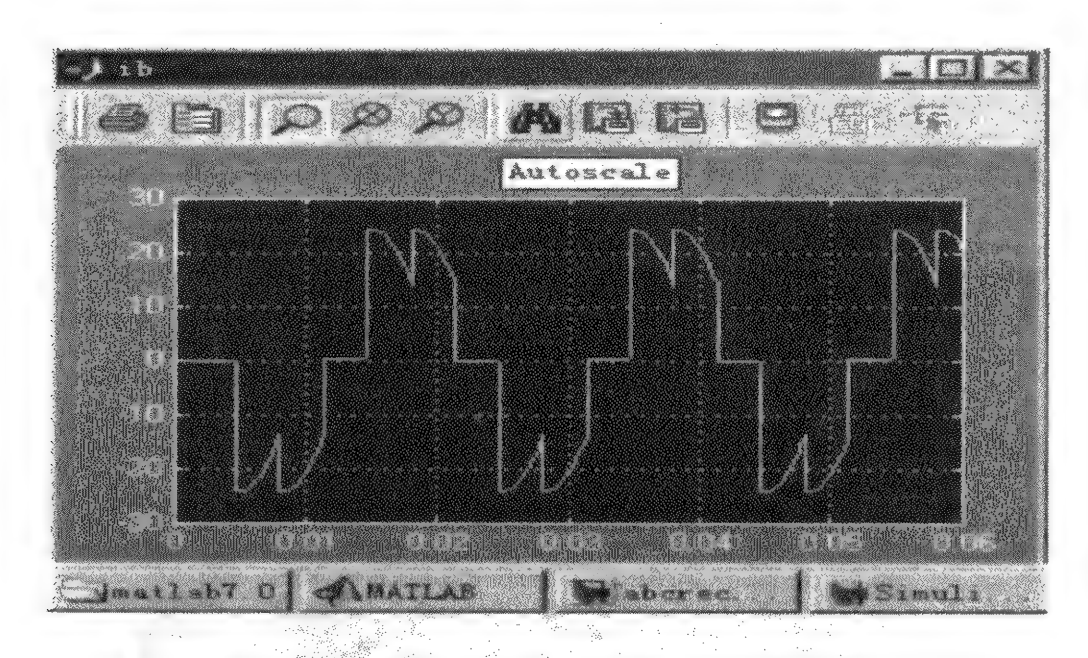


图 5-21　整流变压器二次侧 b 相电流波形

整流器输出电压和电流，如图 5-24 所示（图用 MATLAB 的绘图命令画出）。由于电感是储能元件，电感中电流（见图 5-24c）有一上升过程，在启动仿真 0.08s 以后电流进入稳定状态，电流的脉动很小。

通过傅里叶（Fourier）分析模块可以观察输出波形的各次谐波。双击傅里叶分析模块即弹出分析模块对话框，这里要设置的参数有基波频率和需要分析的谐波次数。傅里叶分析模块每次分析一种次数的谐波，如果需要分析多次谐波，则需要对模型进行多次重复仿真。图 5-25 分别显示了整流器交流侧电流的基波幅值和相位，整流器交流侧电流的 5 次谐波的幅值；整流器输出电压的直流分量（设置傅里叶分析模块的谐波次数为 0 次），和整流器输出电压的 6 次谐波分量值。

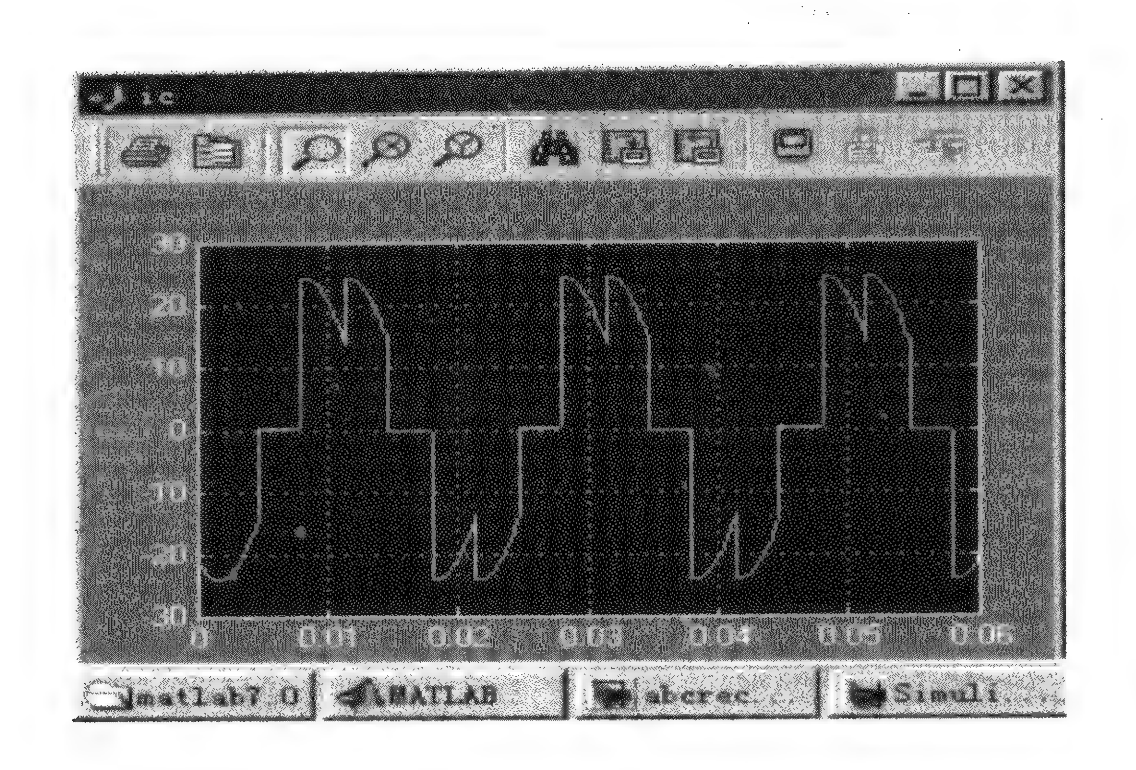


图 5-22　整流变压器二次侧 c 相电流波形

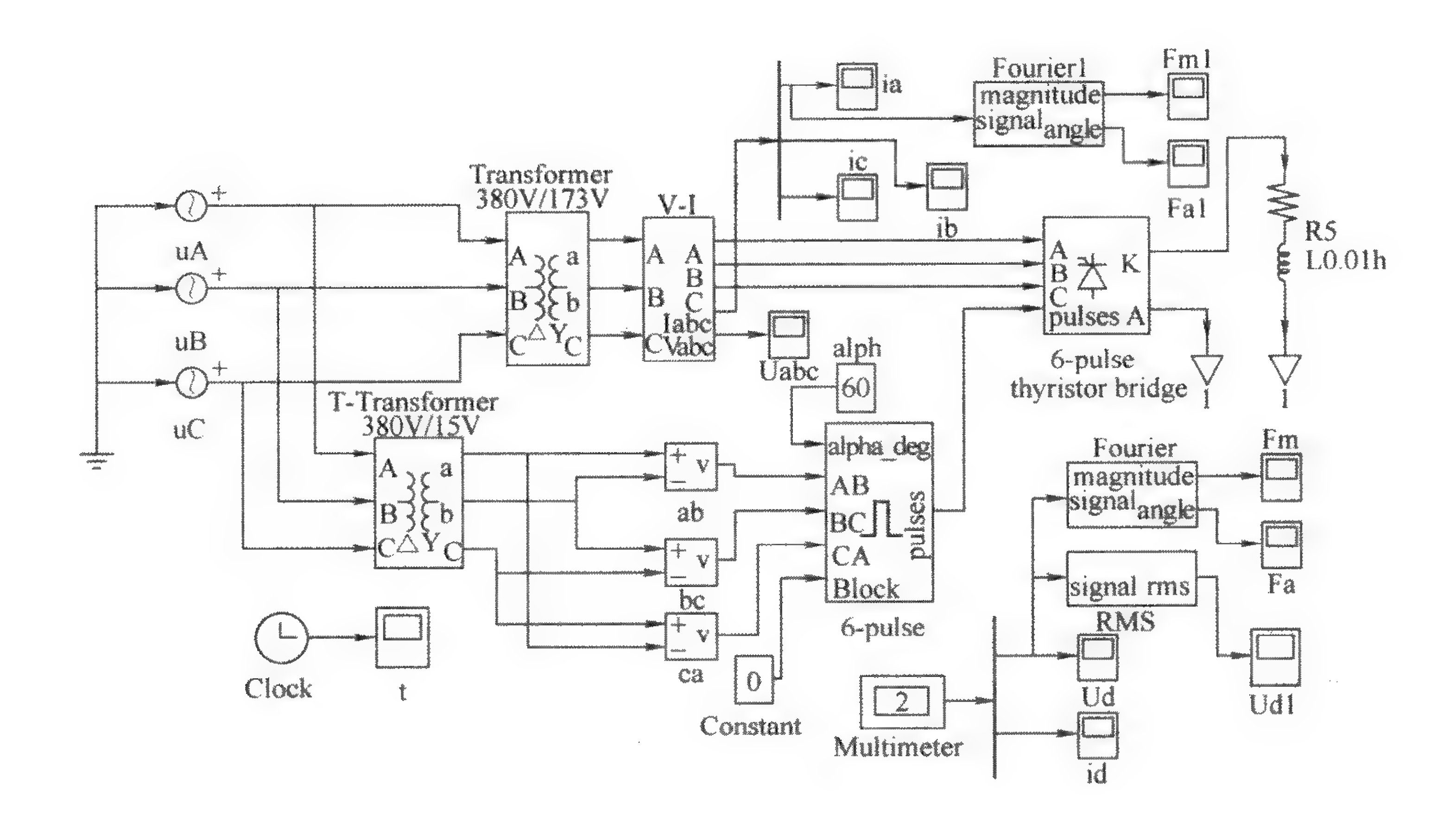


图 5-23　三相桥式整流电路电阻电感负载（$\alpha = 60°$）

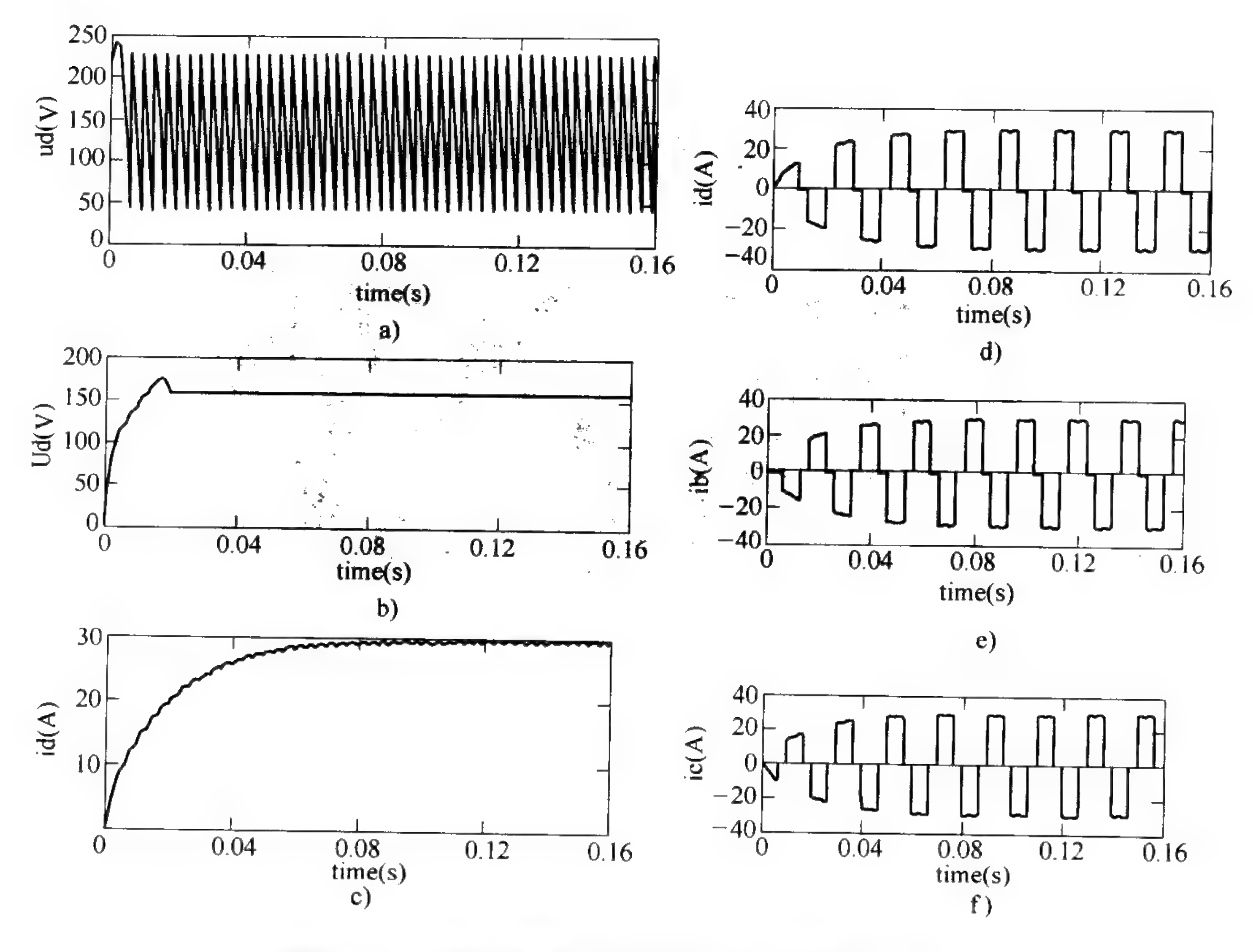


图 5-24　三相桥式整流电路电阻电感负载仿真结果

a）$\alpha=60°$ 时整流器输出电压　b）整流器输出电压平均值

c）整流器输出电流　d）整流变压器二次侧 a 相输出电流

e）整流变压器二次侧 b 相输出电流　f）整流变压器 c 相输出电流

5.1.3　带电容性负载的三相不可控桥式整流电路仿真

在交-直-交电压源型变频器中，一般其 AC-DC 变换部分采用不控整流器，并且中间直流环节采用大电容滤波，这是三相不控桥带电容性负载的电路。这类电路的仿真既可以在可控整流的基础上设控制角 $\alpha=0°$，也可以使用不控的整流模块来仿真。三相不控桥电容性负载的仿真模型如图 5-26 所示。模型由三相电源、三相电压主电流测量模块（V-I）、三相二极管桥（6-pulse diode dridge）和阻容负载组成。模型中设电源电压为 100V，阻容负载是 R 的值为 2Ω、C 的值为 500μF，电阻近似表示了 AC-DC-AC 变换的逆变器及负载。

仿真结果（见图 5-27）显示在整流器接电瞬时，有很大的冲击电流，这是因为电容的初始电压为零，在零状态充电，充电电流很大，电流的冲击在交流侧 B、C 相电流中也有相同反应，因此一般在电路中需要接入电阻或电感来抑制过大的充电电流，在充电结束后再切除电阻。从波形中也可以看到 RC 振荡引起的电流波动。

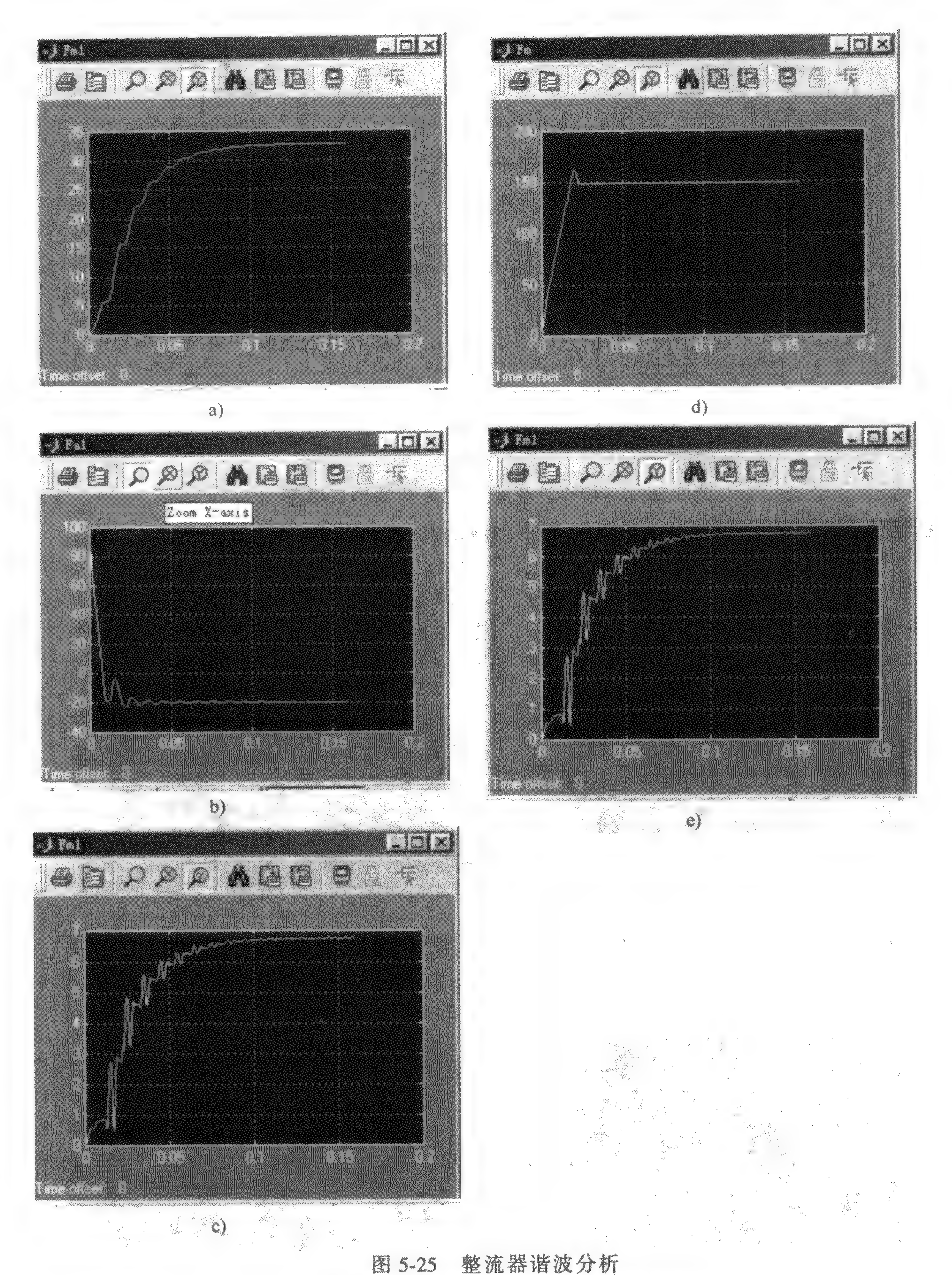


图 5-25 整流器谐波分析

a）A 相电流的基波幅值 b）A 相电流的基波相位

c）A 相电流的 5 次谐波幅值 d）输出电压直流分量幅值

e）输出电压 6 次谐波幅值

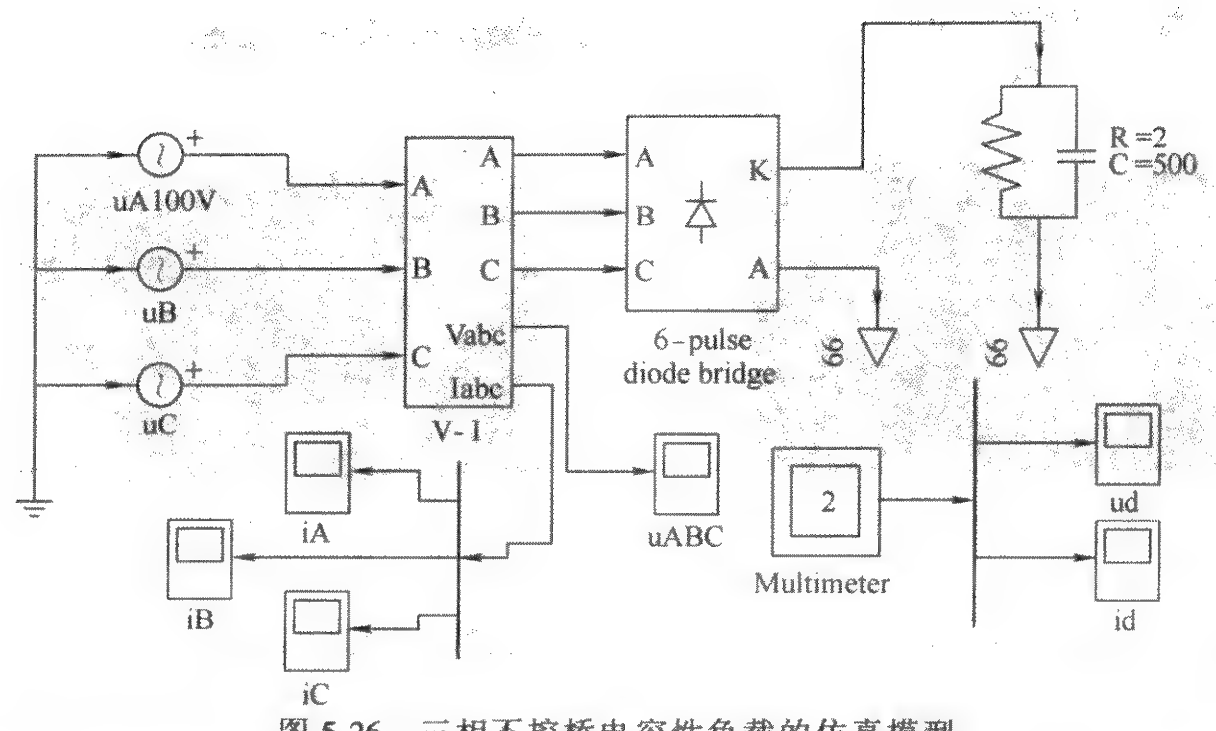


图 5-26　三相不控桥电容性负载的仿真模型

a)

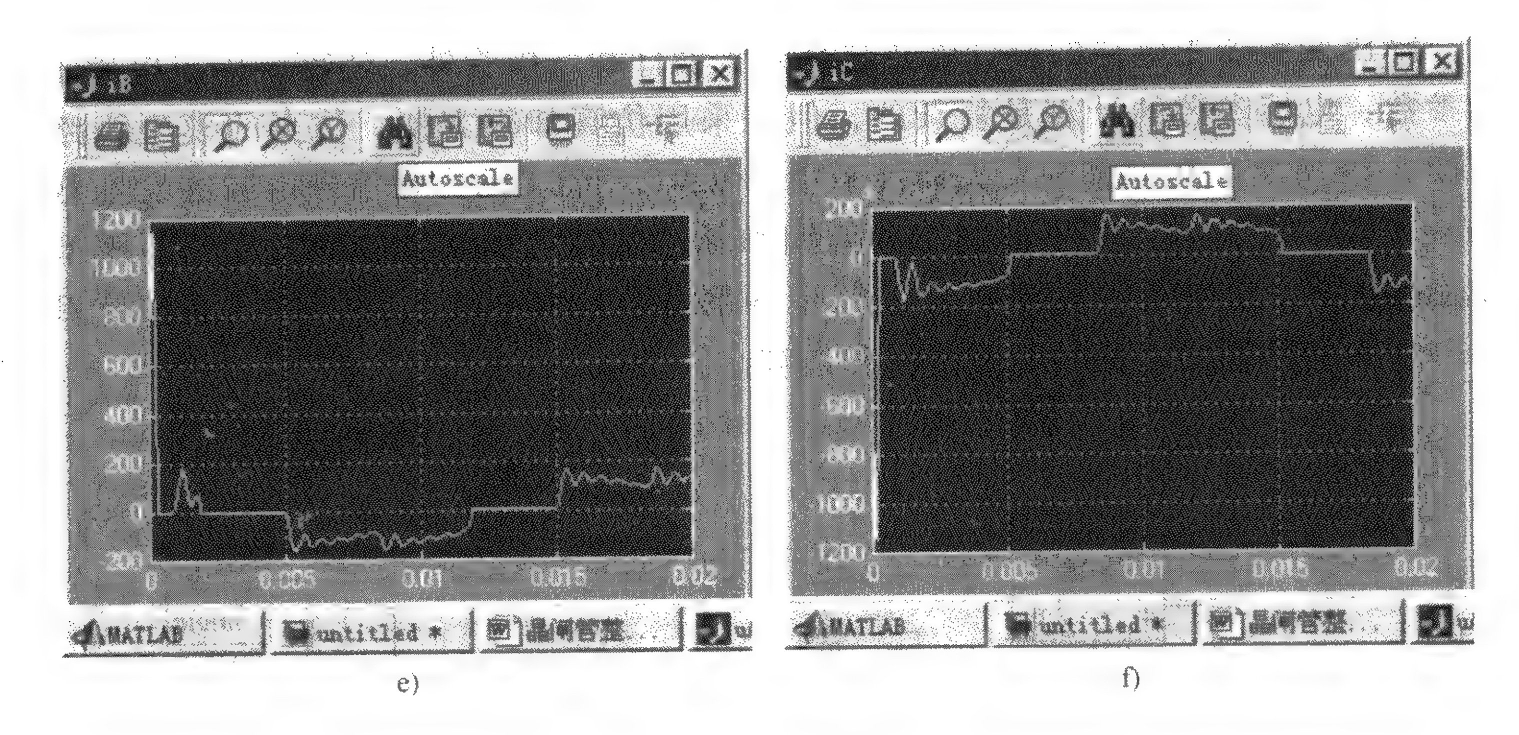
b)

c)

d)

图 5-27　三相不控桥电容性负载电路仿真

a）三相电源电压　b）负载侧电压　c）负载侧电流　d）A 相电流波形



e)　　　　f)

图 5-27　（续）

e) B 相电流波形　f) C 相电流波形

5.2　直流-直流变流器

直流-直流变流器也称直流斩波器（DC Chopper）或 DC-DC 变流器。直流-直流变流器用于调整直流电的电压，它有多种类型，这里主要介绍降压（Buck）变流器、升压（Boost）变流器和桥式（H 型）直流变流器的仿真，其他直流变流器的仿真也可以用同样的方法进行。

5.2.1　直流降压变流器设计

直流降压变流器（Buck Chopper）用于降低直流电源的电压，使负载侧电压低于电源电压，其原理电路如图 5-28 所示。在开关器件 VT 导通时有电流经电感 L 向负载供电，在 VT 关断时，电感 L 释放储能，维持负载电流，电流经负载和二极管 VD 形成回路。调节开关器件 VT 的通断周期，可以调整负载侧输出电流和电压的大小。负载侧输出电压的平均值为

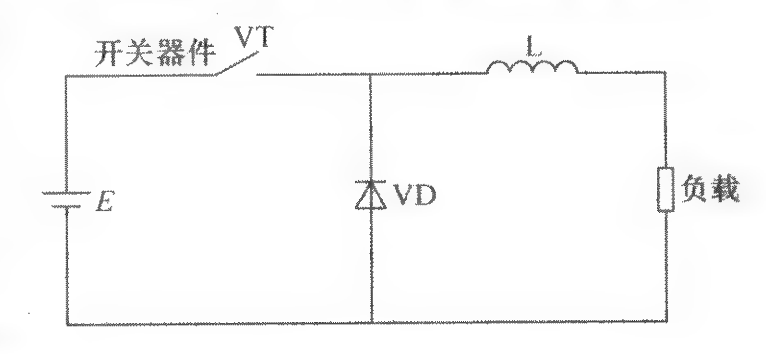


图 5-28　直流降压斩波器原理图

$$U_R = \frac{t_{on}}{T}E = \alpha E$$

式中　T 为 VT 开关周期，t_{on} 为 VT 导通时间，α 为占空比。

降压变流器主电路的设计除要选择开关器件和二极管外，还需要确定电感 L 的参数，电感参数的计算是复杂的，但是采用仿真却很方便。仿真的模型线路如图 5-29 所示。在模型中开关器件采用了 IGBT，IGBT 的驱动信号由脉冲发生器 Pulse 产生，设定脉冲发生器的脉冲周期和脉冲宽度可以调节脉冲占空比。模型中连接了多个示波器，用于观察线路中各部分电压和电流波形，并且通过傅里叶分析来检测输出电压的直流分量和谐波。

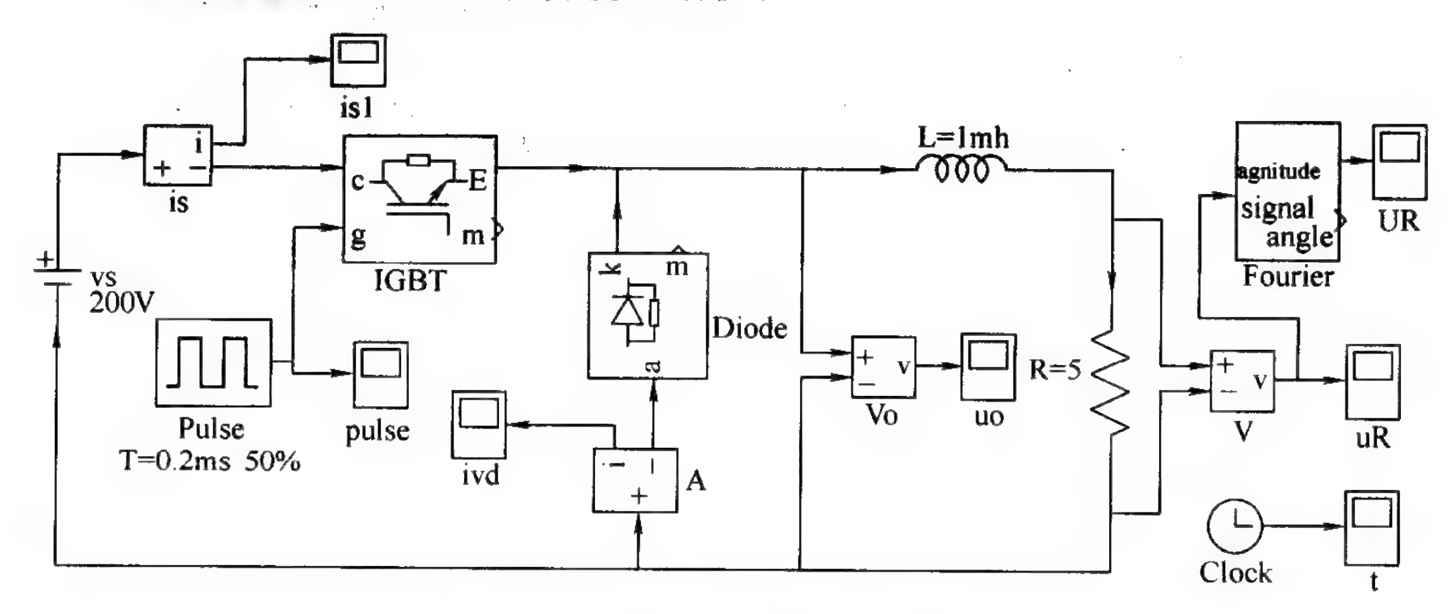


图 5-29　直流降压斩波器仿真模型

【例 5-2】　设直流降压变流器电源电压 $E=200\text{V}$，输出电压 $U_R=100\text{V}$，电阻负载为 5Ω。观察 IGBT 和二极管的电流波形，并设计电感和输出滤波电容值。

仿真步骤如下：

(1) 在模型中设置参数，设置电源 E 电压为 200Ω，电阻的阻值为 5Ω，脉冲发生器脉冲周期 $T=0.2\text{ms}$，脉冲宽度为 50%，IGBT 和二极管的参数可以保持默认值。

(2) 设置仿真时间为 0.002s，算法采用 ode15s。启动仿真。

(3) 仿真结果。

图 5-30a 所示为 IGBT 的驱动脉冲，IGBT 的开关频率为 5kHz，占空比为 0.5。图 5-30b 所示为二极管两端的电压，从图中可以看到，在二极管导通瞬间由于电感的 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 作用使二极管两端电压出现尖峰。图 5-30c 所示为电阻两端的变换器输出电压的波形。图 5-30d 所示为经傅里叶分析得到的输出电压直流分量，通过傅里叶变换也可以分析输出电压的谐波成分。图 5-30e、f 则分别是通过 IGBT 和二极管的电流，从图中可以看到在 IGBT 关断时，电感电流经电阻负载和二极管形成环路，使电阻两端波形连续，但是电压的波动很大，增大电感可以减少输出电压的脉动，但是要增加电感的体积。一般既要减少输出电压的脉动又要使电感不太大，可以采取的措施是提高斩波频率和采用电容滤波。图 5-31 所示为

在电阻两端并联电容 C 的电容值为 100μF 时，斩波频率提高到 10kHz，电感为 L 的值为 0.1mH 时，降压变流器的输出电压波形，尽管电感减小，但是输出电压脉动减小，输出电压更平稳。从本例中可以看到，用仿真来设计电力电子电路，修改电路结构和参数更方便，观察设计的效果更直观。

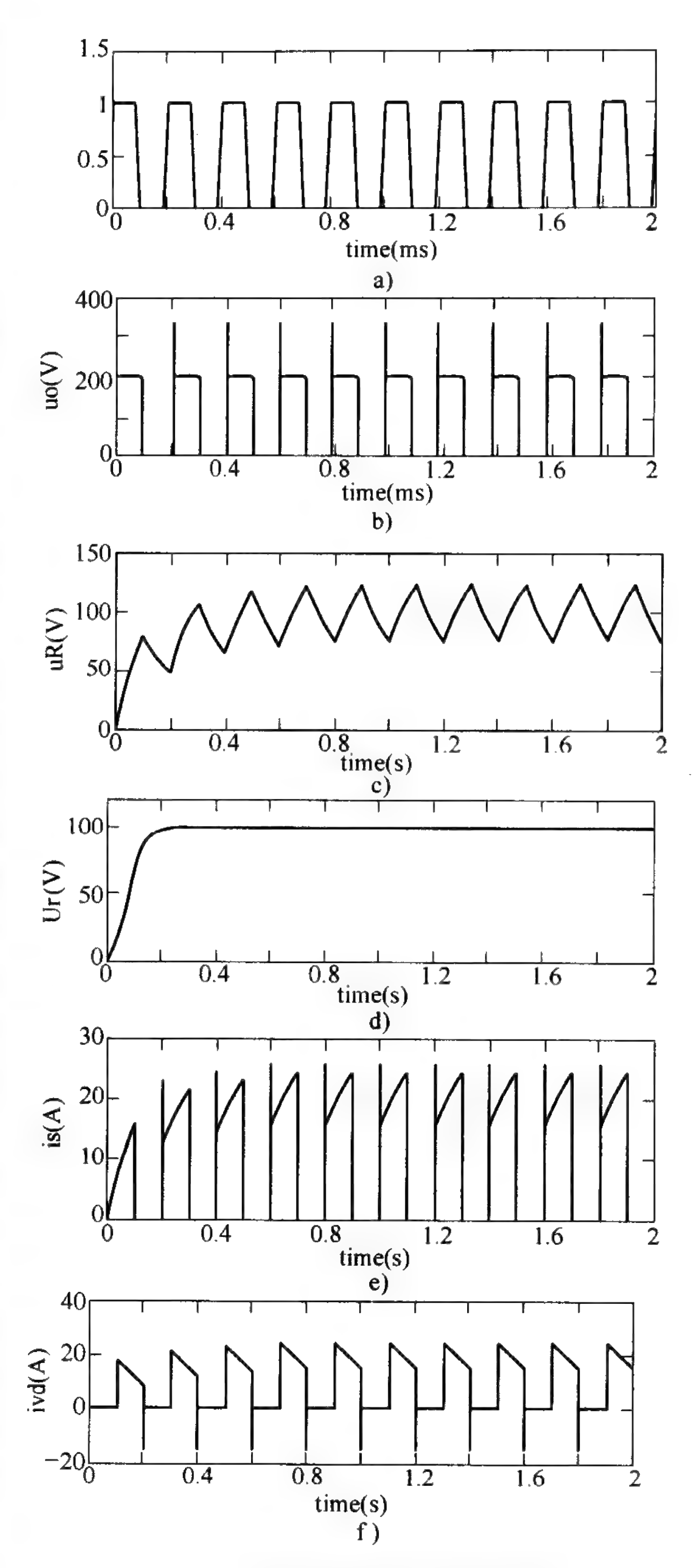


图 5-30 直流降压变流器仿真结果

a) IGBT 的驱动信号 b) 二极管两端电压
c) 降压变流器输出电压 d) 输出电压的直流分量
e) IGBT 的电流 f) 二极管电流

5.2.2 直流升压变流器设计

直流升压变流器（Boost Chopper）用于需要提升直流电压的场合，其原理电路如图 5-32所示。在电路中 IGBT 导通时，电流由电源 E 经升压电感 L 和 VT 形成回路，电感 L 的电流增加，电感储能；当 IGBT 关断时，电感产生的反电动势和直流电源电压串联共同向负载供电，由于在 IGBT 关断时电感的反电动势和直流电源电压方向相同互相叠加，从而在负载侧得到高于电源的电压。二极管的作用是阻断 IGBT 导通时，电容的放电回路。直流升压变流器的电感和电容值设计，同样可以通过仿真来确定。

【例 5-3】 已知直流电源 200V，要求将电压提升到 400V，且输出电压的脉动控制在 5% 以内，负载的等值电阻

a)

b)

图 5-31　带输出滤波的降压变流器仿真

a）带输出滤波的降压变流器模型　b）滤波后降压变流器输出电压波形

为 5Ω。设计一个直流升压变流器，并选择斩波频率、电感和电容参数。

仿真设计步骤如下：

（1）根据直流升压变流器原理电路建立变流器的仿真模型，如图 5-33a 所示。

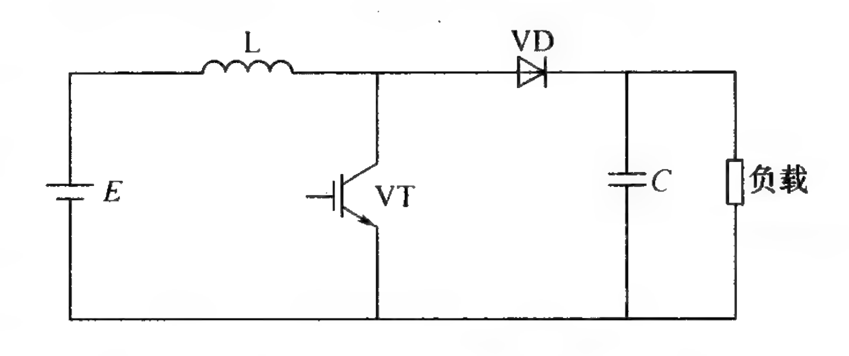


图 5-32　直流升压变流器原理图

（2）设置元件参数。取脉冲发生器脉冲周期为 0.2ms，脉冲宽度为 50 %，初选 L 的值为 0.1mH，C 的值为 100μF。

（3）设置仿真参数，取仿真时间 3ms，仿真算法采用 ode15。

观察仿真结果，从图 5-33c 可见，选择的参数已能满足要求，输出电压达到 400V，脉动在 5 %以内。如果需要进一步减少输出电压波动，可以提高脉冲发

生器产生脉冲的周期，并选择多组 LC 参数比较以得到更满意的结果。

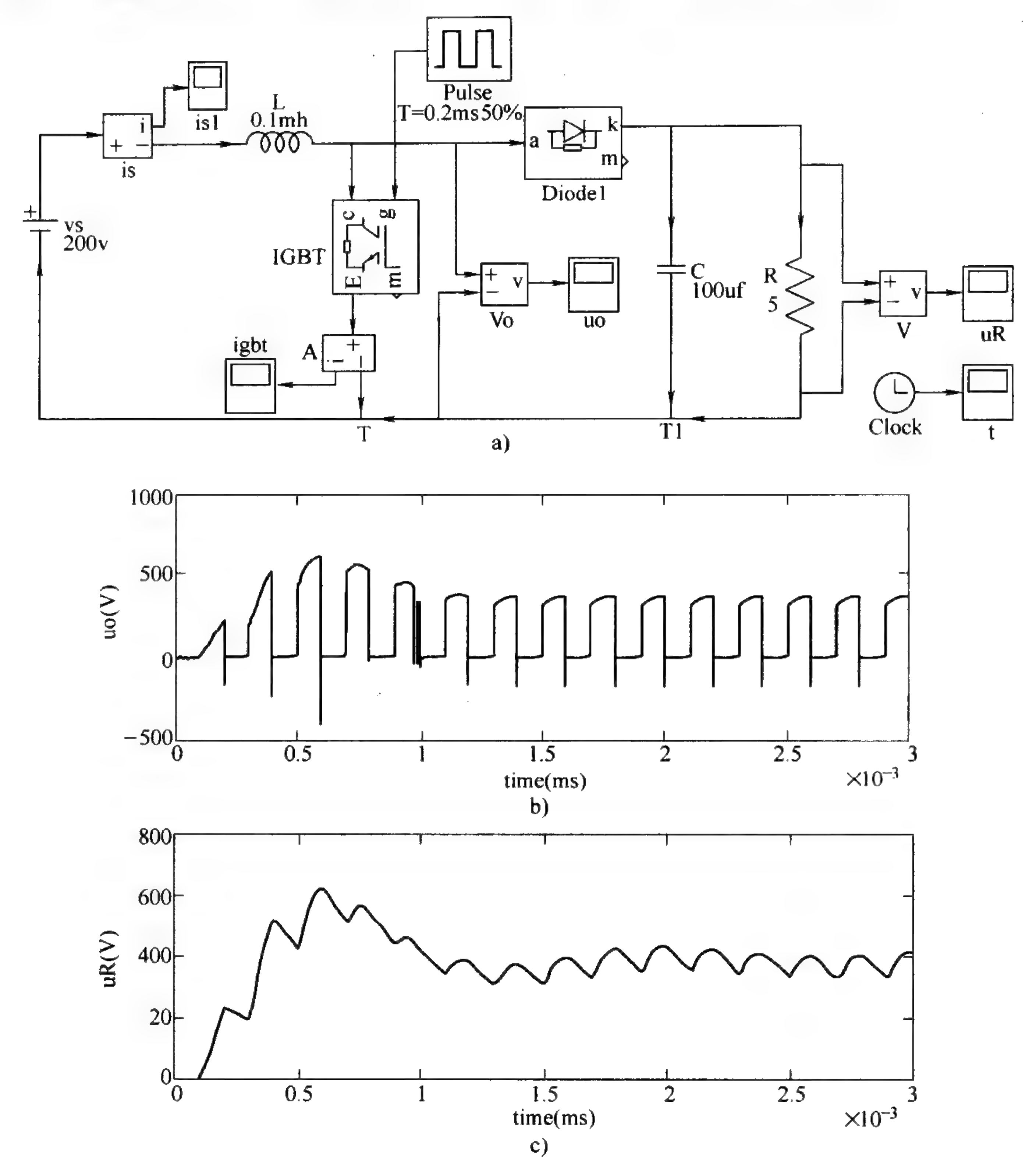


图 5-33　直流升压变流器仿真模型及结果

a）直流升压变流器模型　b）IGBT 两端电压波形

c）输出电压波形

5.2.3　桥式直流 PWM 变流器仿真

桥式直流 PWM 变流器又称 H 型变流器和四象限直流-直流变流器，桥式直流 PWM 变流器常用作直流电动机的可逆运行，其原理电路如图 5-34 所示。图中

的开关器件可以是电力晶体管、电力场效应晶体管和 IGBT 等。桥式可逆直流 PWM 变流器从控制方式上区分有双极式调制、单极式调制和受限单极式调制三种。

1. 双极式调制

四个开关器件 VT1 和 VT4，VT2 和 VT3 两两成对，同时导通和关断，且工作于互补状态，即 VT1 和 VT4 导通时，VT2 和 VT3 关断，反之亦然。控制开关器件的通断时间（占空比）可以调节输出电压的大小，若 VT1 和 VT4 的导通时间大于 VT2 和 VT3 的导通时间，输出电压的平均值为正，VT2 和 VT3 的导通时间大于 VT1 和 VT4 的导通时间时，则输出电压的平均值为负，所以可用于直流电动机的可逆运行。变流器四个开关器件的驱动一般都采用 PWM 方式，由调制波（三角波或锯齿波）与直流信号比较产生驱动脉冲，由于调制波频率较高（通常在数千赫兹以上），所以变流器输出电流一般连续，用于直流电动机调速时电枢回路不用串联电抗器，但四个开关器件都工作于 PWM 方式开关损耗较大。

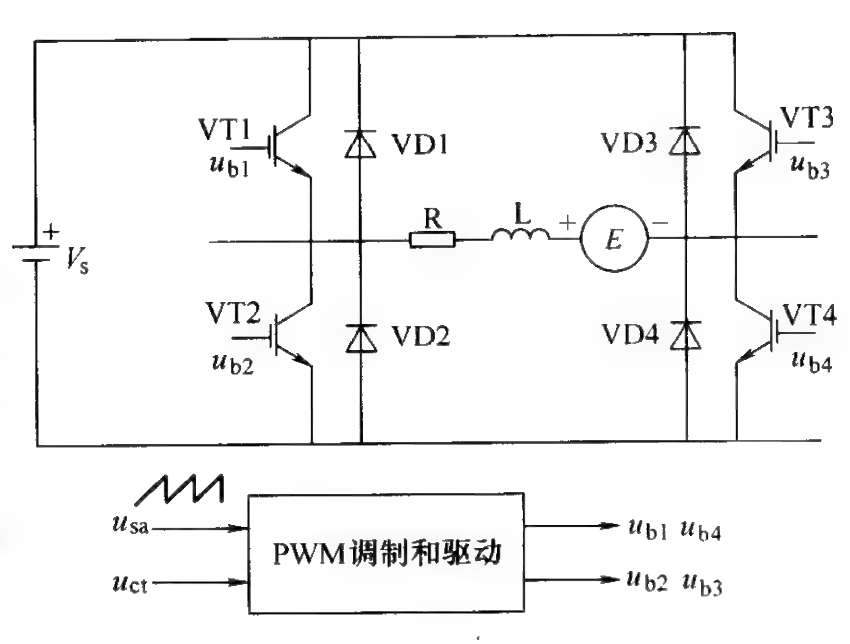


图 5-34 桥式直流 PWM 变流器

2. 单极式调制

四个开关器件中 VT1 和 VT2 工作于互补的 PWM 方式，而 VT3 和 VT4 则根据电动机的转向采取不同的驱动信号，电动机正转时，VT3 恒关断，VT4 恒导通；电动机反转时，VT3 恒导通，VT4 恒关断。由于减少了 VT3 和 VT4 的开关次数，开关损耗减少，这是单极式调制的优点。

3. 受限单极式调制

在单极式调制基础上，为进一步减小开关损耗和减少桥臂直通的可能性，在电动机要求正转时，只有 VT1 工作于 PWM 方式，VT4 始终处于导通状态，而 VT2 和 VT3 都关断；电动机反转时，只有 VT2 工作于 PWM 方式，VT3 始终处于导通状态，而 VT1 和 VT4 都关断，这就是受限单极式调制。在受限单极式工作模式，当电动机电流较小时会出现电流断续的现象。

双极式调制直流 PWM 变流器的仿真模型如图 5-35 所示。图中开关器件 VT1 ~ VT4 为四个 MOSFET 作桥式连接，且 VT1 和 VT4 的栅极由一路信号驱动，VT2 和 VT3 的栅极由另一路信号驱动，它们成对导通。栅极驱动信号由驱动电路产生，驱动电路由锯齿波发生器 Repeating Sequence、延迟器 Relay 和倒相器 Gain 等

模块组成。锯齿波与常数模块 Contant 给出的电压相比较，当锯齿波信号大于比较电压信号时，延迟模块 Relay 的输出为“1”，触发 VT1 和 VT4 导通，同时，锯齿波与比较电压的差值信号在倒相后使延迟模块 Relay1 的输出为“0”，使 VT2 和 VT3 关断；如果锯齿波信号小于比较电压信号，则 VT1 和 VT4 关断，VT2 和 VT3 导通，从而实现对直流电源电压的调制，并且 VT1、VT4 和 VT2、VT3 的工作状态是互补的（见图 5-36）。模型中取锯齿波幅值为 - 1 ~ 1，因此在比较电压信号为 0 ~ 1 时，变流器输出电压的正半周大于负半周，负载侧平均电压为正；在比较电压信号为 0 ~ - 1 时，变流器输出电压的负半周大于正半周，负载侧平均电压为负。

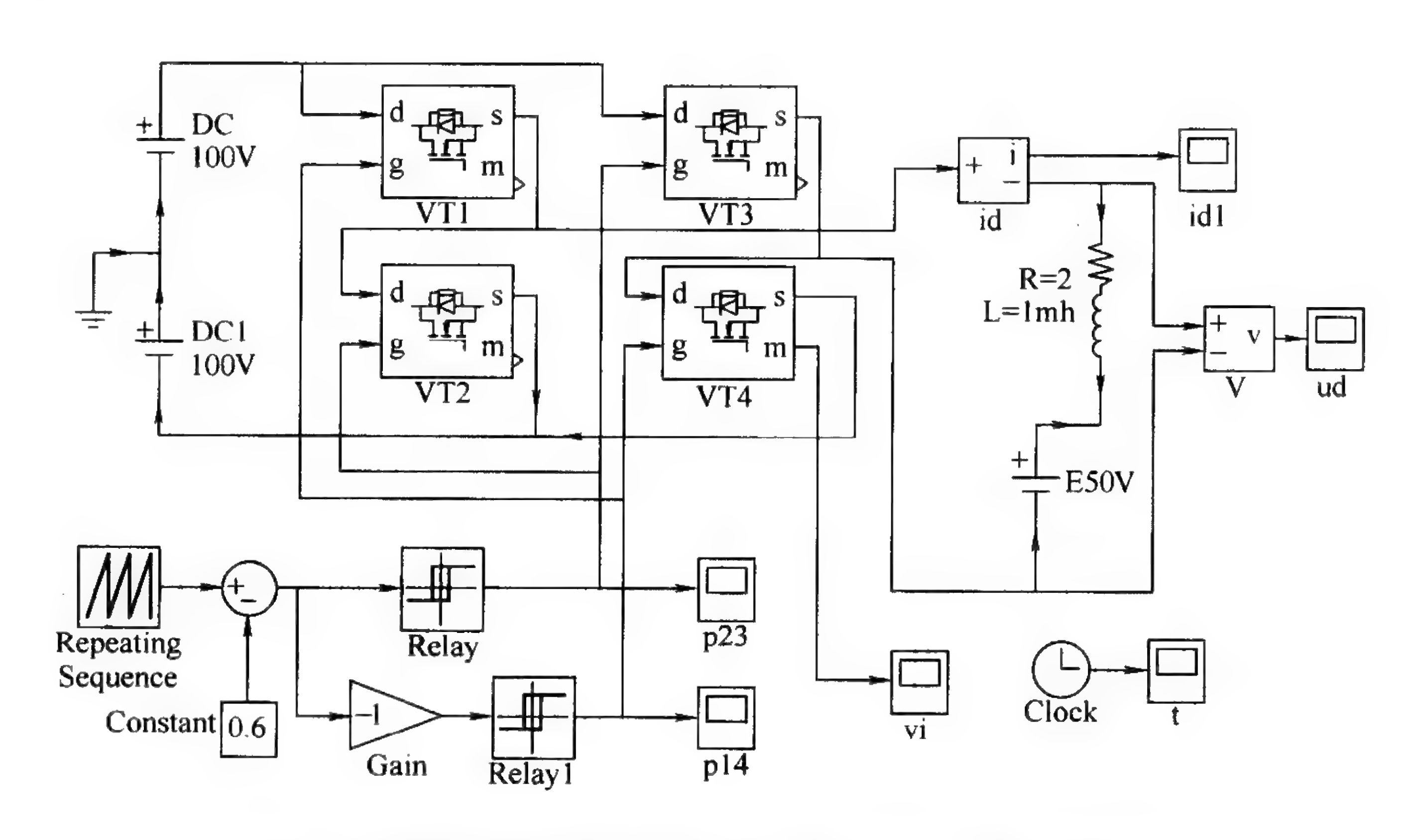


图 5-35　桥式直流 PWM 变流器（双极性调制）的仿真模型

对于单极式和受限单极式直流变流器的仿真可以在双极式电路的基础上修改驱动信号来实现。

【例 5-4】　观察 H 型直流调压器的输出电压、电流波形。已知电源电压为 200V，RL 负载，其中 R 的值为 2Ω、L 的值为 1mH、$E = 50$V。

建立电路模型如图 5-35 所示。驱动线路参数，取锯齿波重复周期 3e - 4s，幅值为“1”；延迟环节导通点都取 1e - 4，关断点都取 - 1e - 4，导通值取“1”，关断值设“0”；并按已知条件设置电源和负载参数。在比较电压为 0.6V 时的仿真结果如图 5-37 所示，其中图 5-37a 所示为负载两端电压波形，图 5-37b 所示为负载的电流波形，改变比较电压或负载，可以观察各种不同条件下变流电路的工作情况。提高锯齿波的调制频率，调压器输出电流的波动可以显著减小。

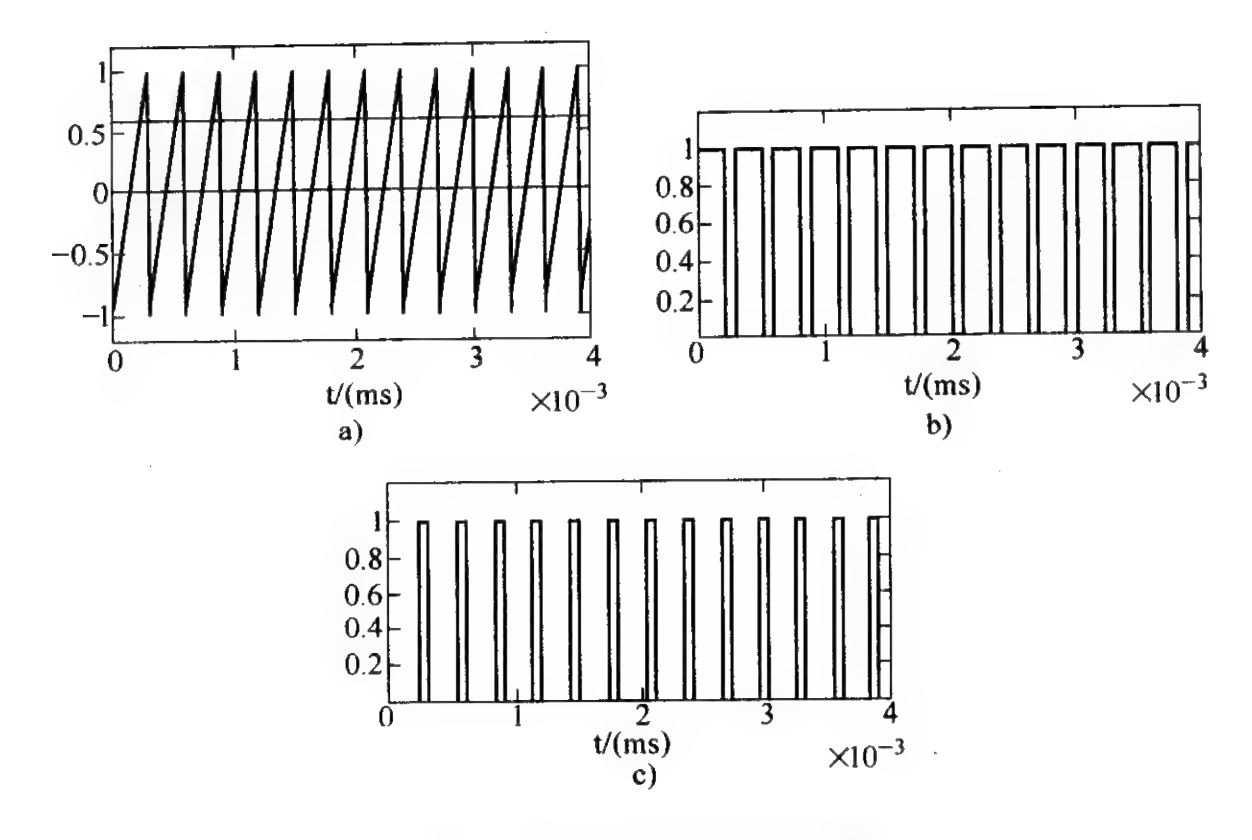


图 5-36 PWM 调制和驱动信号

a) PWM 调制 b) VT1 、VT4 驱动脉冲

c) VT2 、VT3 驱动脉冲

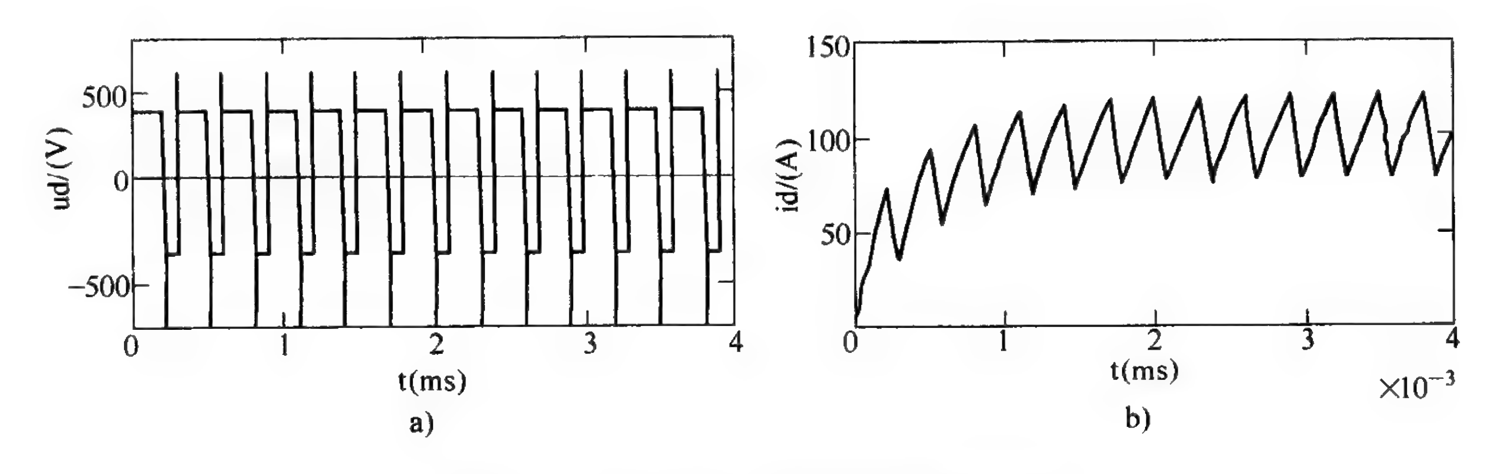


图 5-37 H 型 PWM 直流调压器仿真结果

a) 负载两端电压波形 b) 负载电流波形

5.3 直流-交流变流器

5.3.1 三相电压源型 SPWM 逆变器仿真

三相电压源型 SPWM 逆变器是在通用变频器中使用最多的，用 SIMULINK 模块仿真三相电压源型 SPWM 逆变器很方便，使用模型库的多功能桥模块（Universal Bridge）和 PWM 脉冲发生器（PWM Generator）就能实现。三相电压源型 SP-

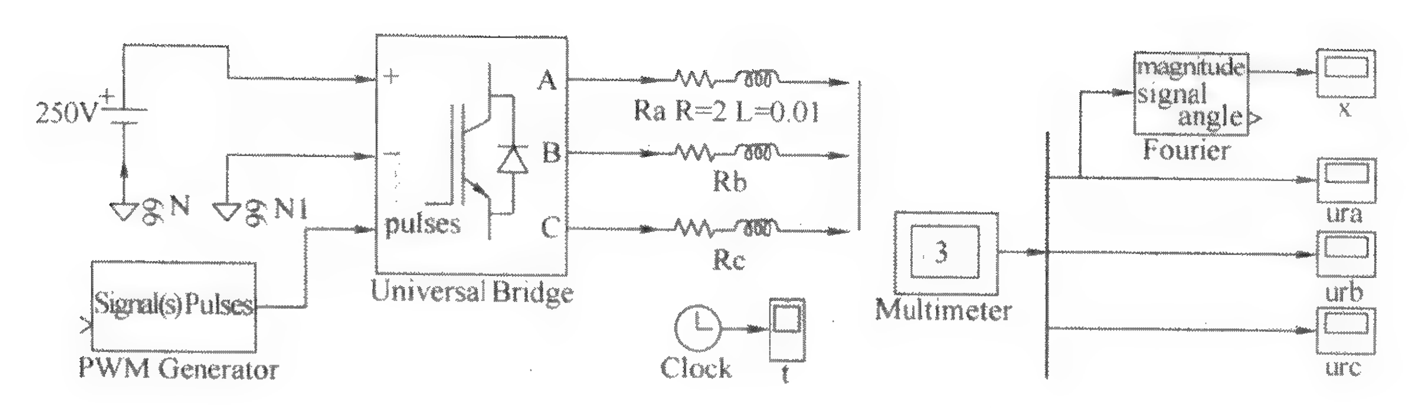
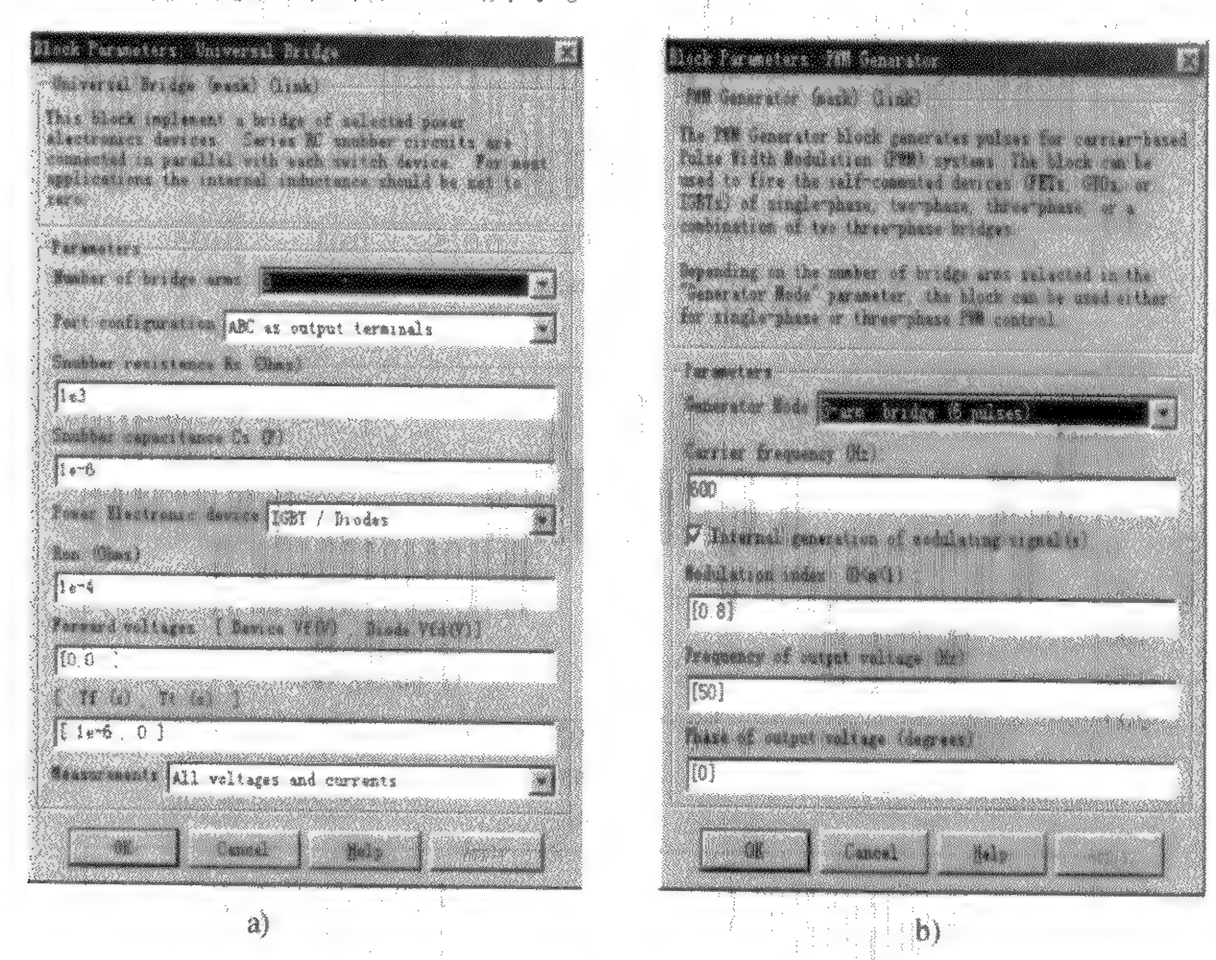


图 5-38　三相 SPWM 逆变器仿真模型

WM 逆变器的仿真模型如图 5-38 所示。



a)　　　　　　　　b)

图 5-39　SPWM 逆变器模型的参数设置

a) 多功能桥对话框　b) PWM 发生器对话框

SPWM 逆变器模型的参数设置如图 5-39 所示。对多功能桥设为三相桥臂，三相在输出端，开关器件选择了 IGBT。并且在测量中选择了电压和电流，这是为便于通过多路测量器（Multimeter）观测 IGBT 承受的电压和电流，为选择 IGBT 参数提供依据。IGBT 的驱动信号由 PWM 信号发生器产生，在发生器对话框中，选择了内产生调制信号方式，当然也可以采用外调制信号输入方式，这时需要外加三相正弦调制信号。选择三角波频率仅为 600Hz，这样观察电压波形比较清楚，实用频率要高得多。

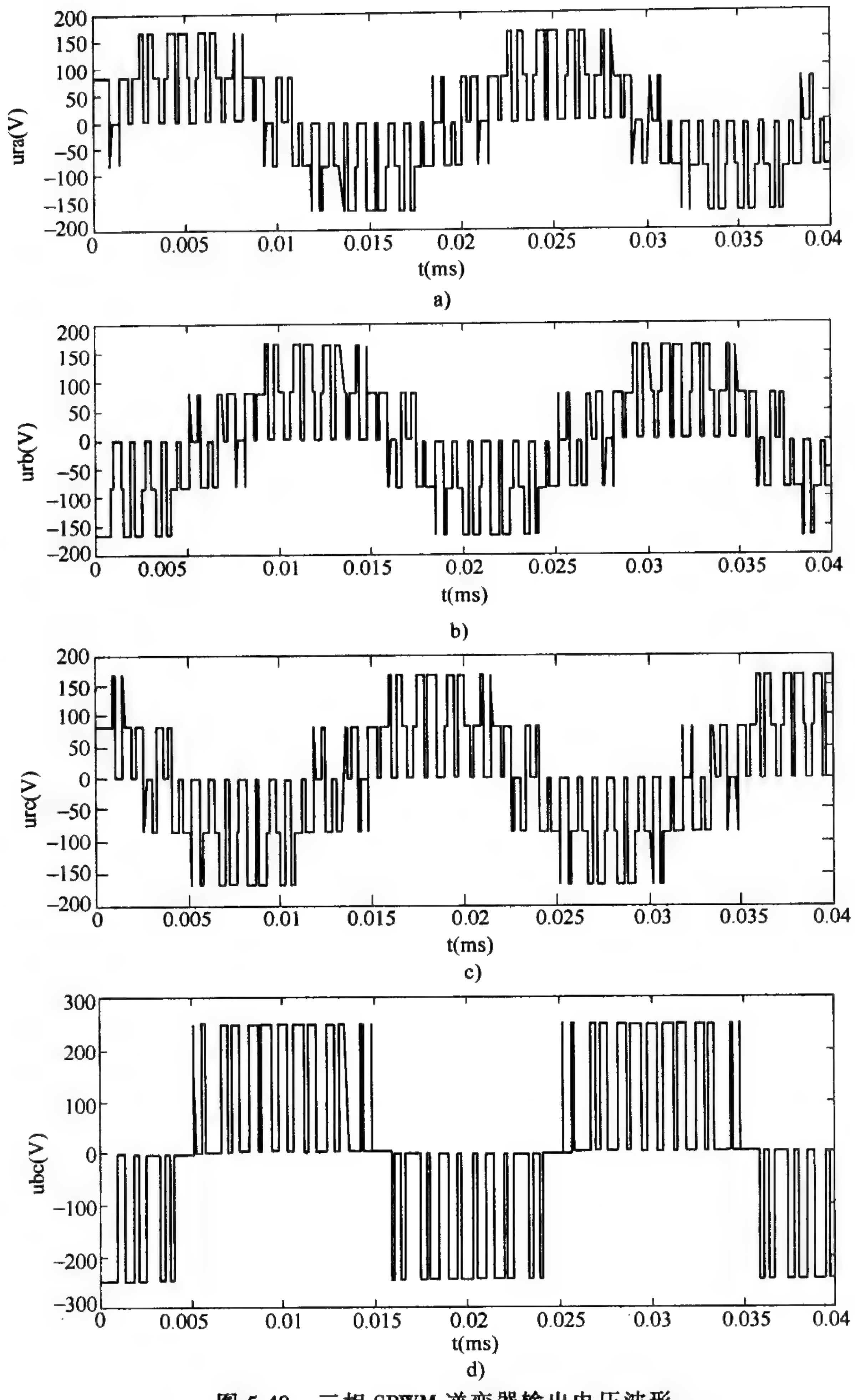


图 5-40　三相 SPWM 逆变器输出电压波形

a）逆变器输出 a 相电压波形　b）逆变器输出 b 相电压波形

c）逆变器输出 c 相电压波形　d）逆变器输出线电压波形

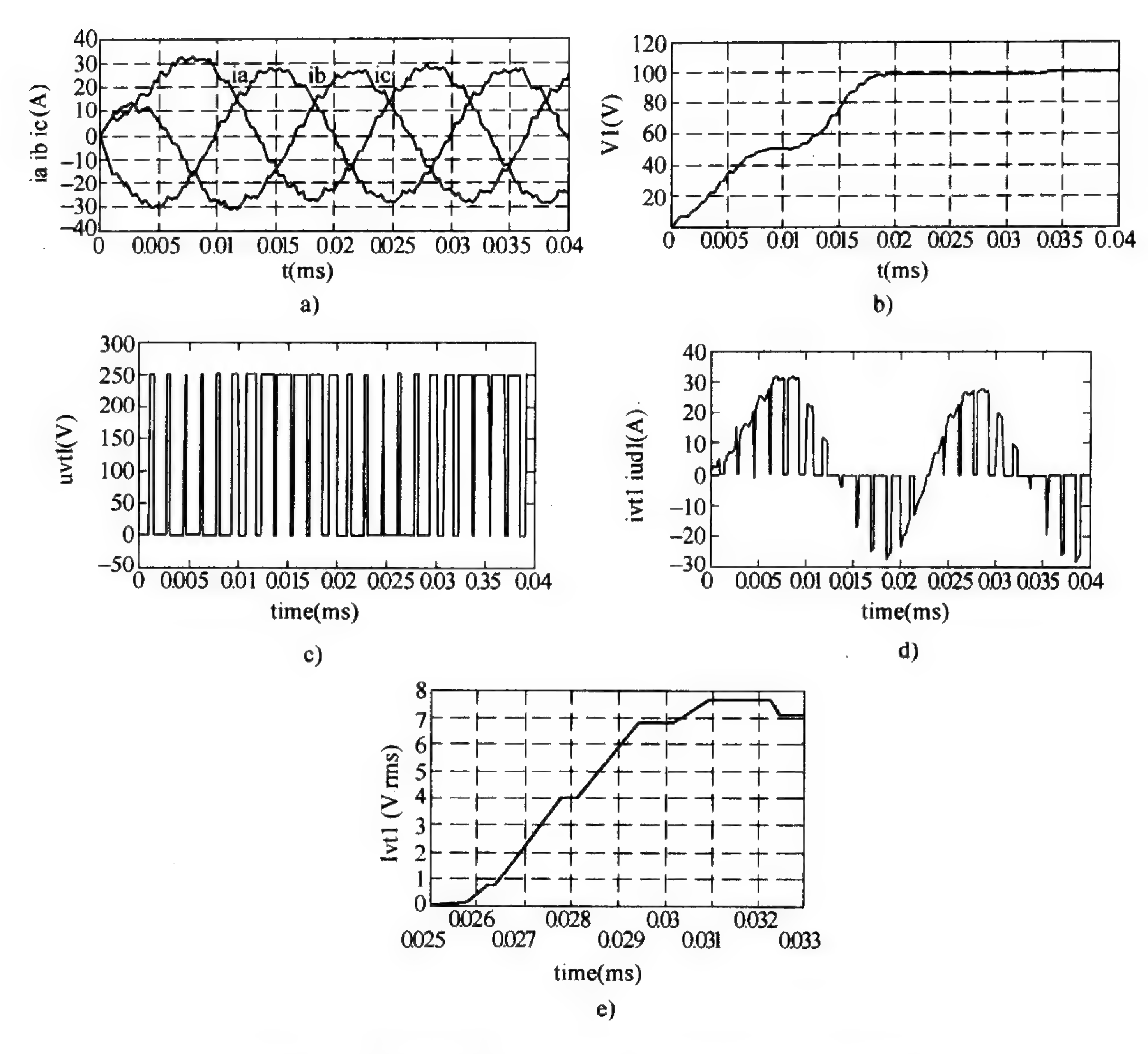


图 5-41　逆变器电流、电压及 IGBT 承受的电压和电流

a）逆变器输出三相电流波形　b）相电压基波有效值

c）IGBT 承受的电压　d）IGBT 通过的电流

e）IGBT 通过的电流有效值

图 5-40a～图 5-40c 所示为逆变器输出的三相相电压波形，图 5-40d 所示为逆变器输出的线电压波形（bc 相）。图 5-41a 所示为逆变器输出的三相电流波形，图 5-41b 所示为逆变器 a 相上桥臂 IGBT（VT1）和与 IGBT 反并联二极管（VD1）的电流，通过多功能模块观察的电流波形电流波形为一相桥臂的电流，该电流包含 IGBT 和二极管的电流两部分，因此该电流的正向部分是通过 IGBT 的电流，反向部分为二极管的电流。图 5-41c 所示为一周期中（0.025～0.033ms）通过 IGBT 电流的有效值。图 5-41d 和图 5-41e 所示分别为输出相电压的基波电压有效值和 IGBT（VT1）承受的电压波形。通过 IGBT 承受的电压和电流，加上一定的裕量，可以选择 IGBT 的电压和电流参数。

5.3.2 电流跟踪型逆变器仿真

电流跟踪型逆变器使逆变器的输出电流跟随给定的电流波形变化，这也是一种 PWM 控制方式。电流跟踪一般都采用滞环控制，即当逆变器输出电流与给定电流的偏差超过一定值时，改变逆变器的开关状态，使逆变器的输出电流增加或减小，将输出电流与给定电流的偏差控制在一定范围内，其工作原理如图

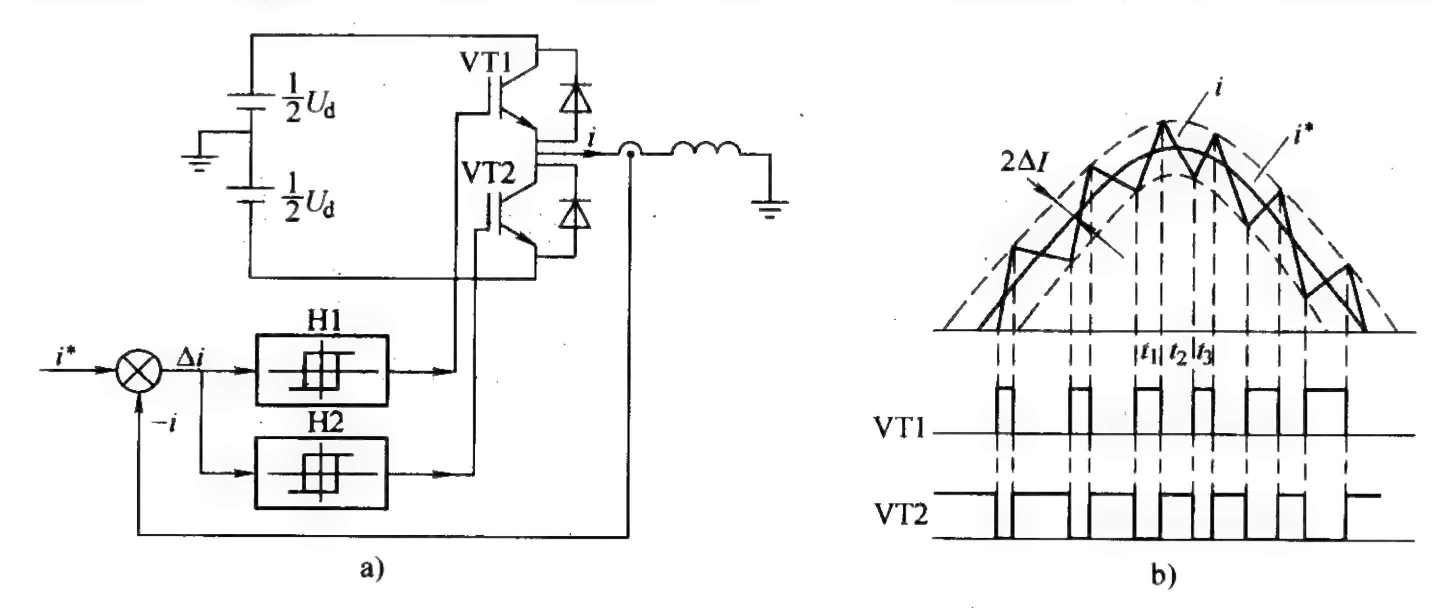


图 5-42 单相电流跟踪型逆变器原理

a）原理图 b）驱动脉冲

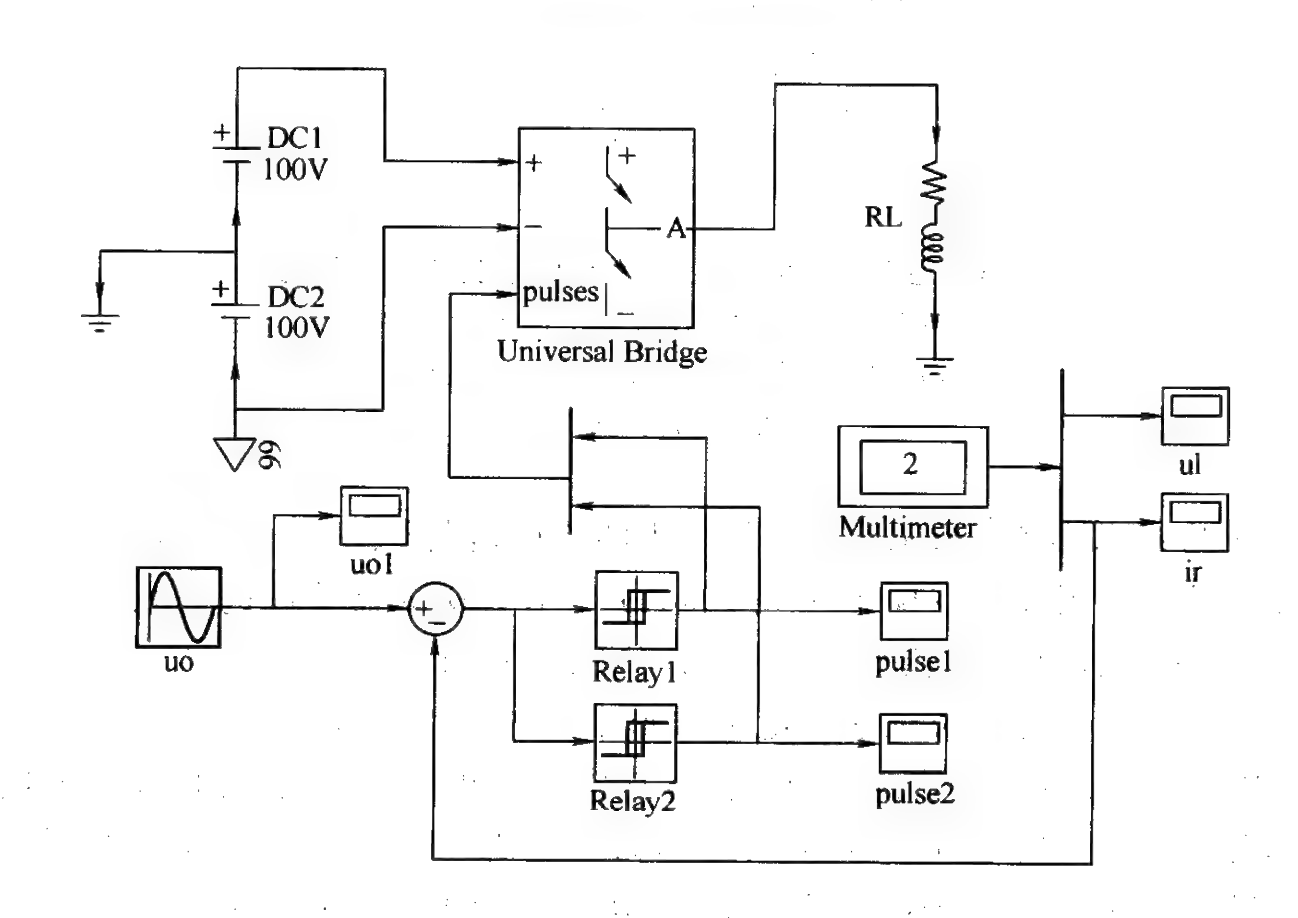


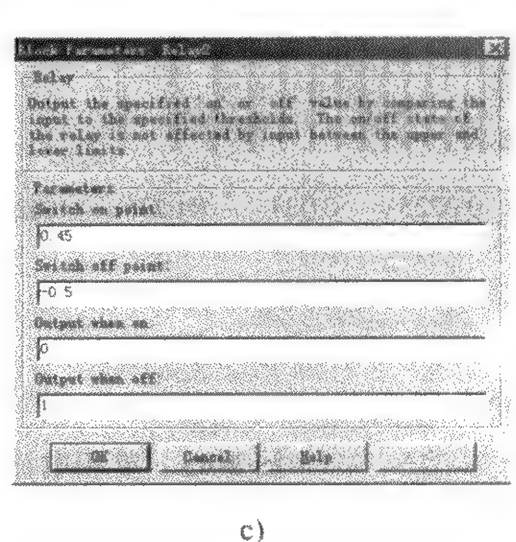
图 5-43 滞环控制逆变器仿真模型

5-42 所示。

图 5-42a 所示为单相电流跟踪型逆变器，逆变器通过检测负载电流 i，并与给定电流 i^* 比较，偏差信号经滞环控制器 H1、H2，当偏差超过滞环控制器的环宽 ΔI 时，则改变逆变器开关状态，且当 VT1 导通时，负载电流增加，VT2 导通时电流下降。跟踪控制电流的波形如图 5-42b 所示，在 t_1 时刻，VT1 导通负载电流 i 增加，到 t_2 时刻，$i > i^* + \Delta I$，VT1 关断、VT2 导通，电流 i 下降，到 t_3 时刻，$i < i^* - \Delta I$，VT2 关断、VT1 导通。如此周而复始，逆变器输出电流 i 将随给定电流 i^* 的波形作锯齿型变化，而滞环控制器的环宽 ΔI 则决定了锯齿型变化的范围，ΔI 较小，逆变器输出电流跟踪给定的效果更好，但是逆变器的开关频率将提高，开关的损耗也更大。在跟踪型逆变器中选择适当的环宽是很重要的。

a)

b)



c)

图 5-44　跟踪控制逆变器模型参数

a) 逆变器参数设置　b) 滞环控制 H1 参数　c) 滞环控制 H2 参数

5.3.2.1 单相跟踪控制逆变器的仿真

按图 5-42 所示原理设计的单相跟踪控制逆变器仿真模型如图 5-43 所示，其中图 5-43a 所示为逆变器（Universal Bridge）模块的参数；图 5-43b 和图 5-43c 所示分别为滞环控制器（Relay1，2）模块的参数，模块中滞环宽度取值左右不等，是为留有桥臂上下开关交替导通时的“死区”，避免换流时的直通现象。图 5-44 所示为跟踪控制逆变器模型参数。仿真的结果如图 5-45 所示。

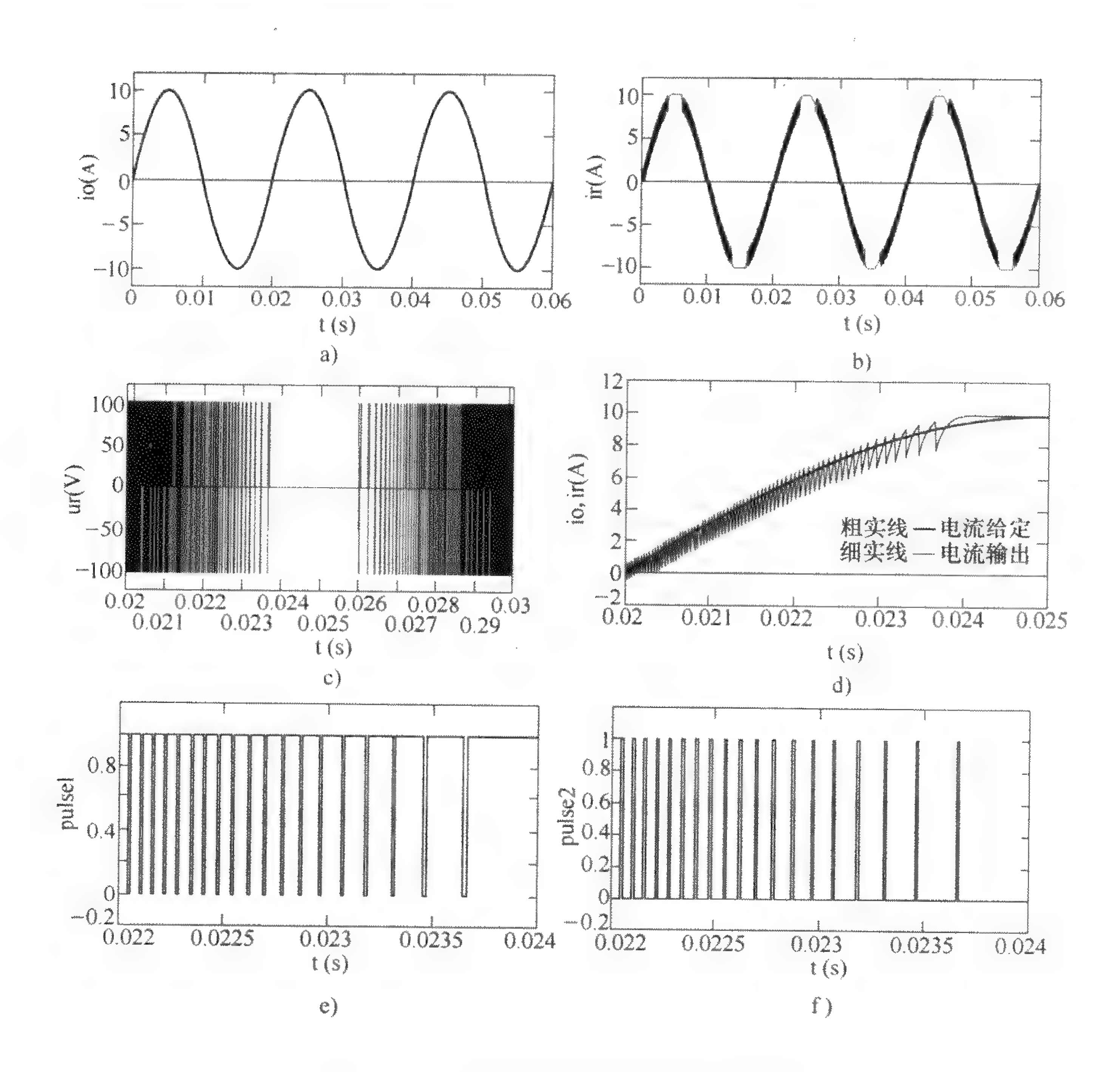


图 5-45 单相电流滞环控制器仿真波形

a）电流给定值 b）输出电流 c）输出电压（1/2 周期）
d）输出与给定电流的比较（1/4 周期） e）上桥臂 IGBT
驱动脉冲 f）下桥臂 IGBT 驱动脉冲

5.3.2.2 三相电流跟踪逆变器仿真

三相电流跟踪逆变器由三组单相电流跟踪逆变器组成，其仿真模型如图 5-46 所示，其中滞环控制器（Subsystem）由三个单相电流滞环控制器打包组成，其结构如图 5-47 所示。三相负载电流由多路测量器（Multimeter）观测。三相电流跟踪逆变器的波形如图 5-48 所示。

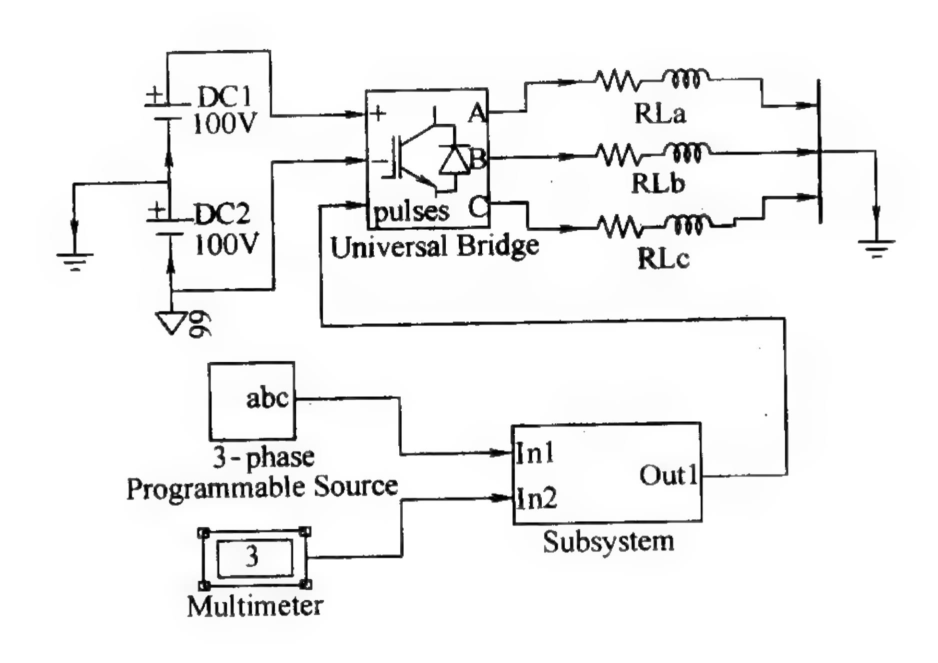


图 5-46 三相电流跟踪逆变器仿真模型

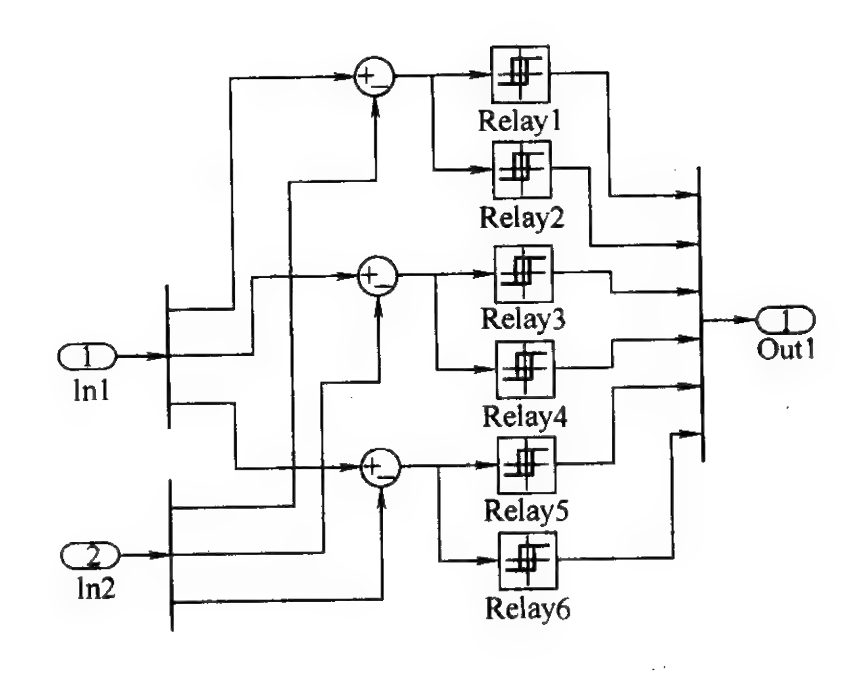


图 5-47 滞环控制器内部结构

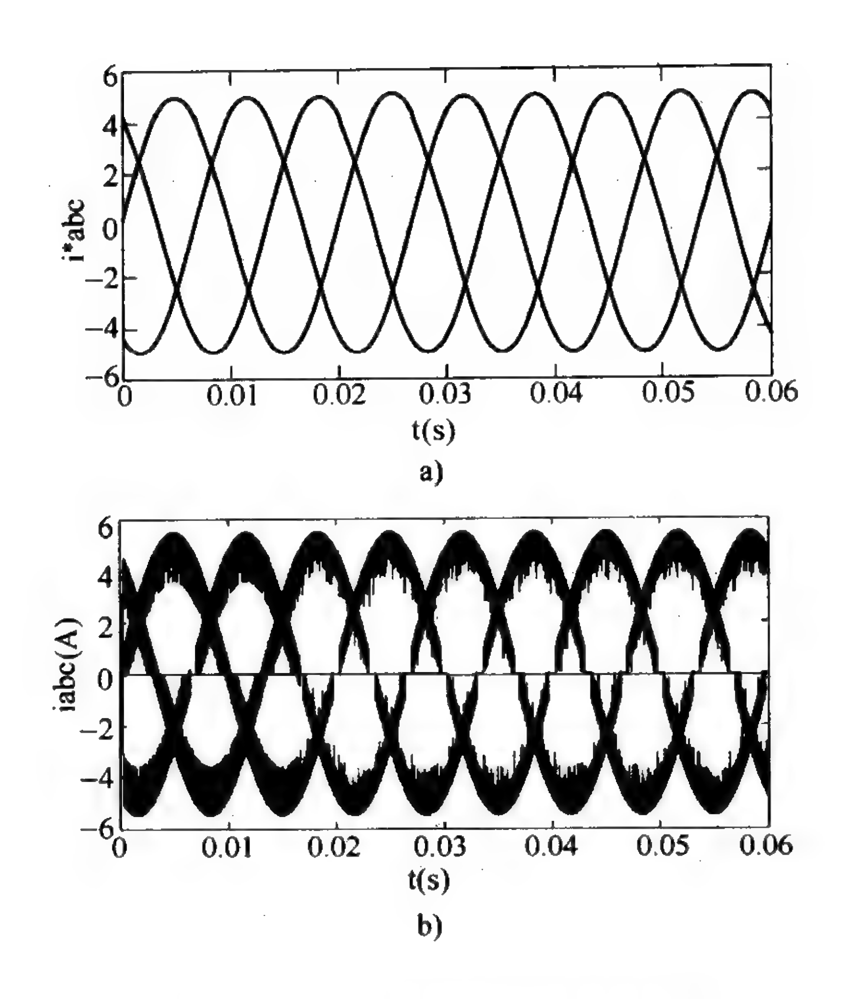


图 5-48　三相电流跟踪逆变器的波形

5.4　交流-交流变流器

交-交变流包括交流调压和交-交变频。交流调压是指不改变交流电压的频率而只调节电压的大小的方法。过去交流调压用变压器实现，在电力电子技术出现后，采用电力电子器件的交流调压器不仅可以对电压进行连续调节，并且体积小、重量轻、控制灵活方便，在灯光控制、家用风扇调速、交流电机的调压调速和软起动、以及交流电机的轻载节能运行中得到了广泛的应用。交-交变频是通过电力电子电路的开关控制将工频三相交流电改变为其他频率的单相或三相交流电，也称直接变频器和周波变流器，一般交-交变频器在改变频率的同时也调节电压的大小。

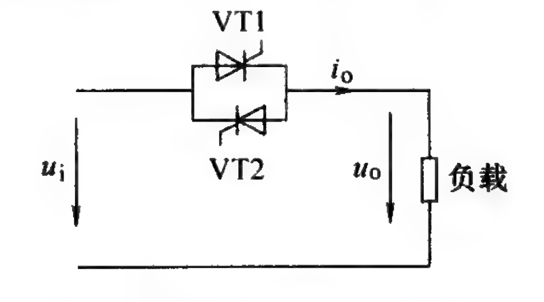


图 5-49　单相交流调压电路

5.4.1　单相交流调压器仿真

交流调压线路有采用晶闸管器件的相位控制和采用全控元件的 PWM 控制两种方式，这里主要介绍晶闸管控制的交流调压电路。PWM 控制的交流调压仿真

在前节介绍的直流-直流变流仿真基础上很容易实现。

由晶闸管控制的单相交流调压电路如图 5-49 所示。反并联连接的晶闸管 VT1 和 VT2 组成了交流双向开关，在交流输入电压的正半周，VT1 导通，在交流输入电压的负半周，VT2 导通，控制晶闸管的导通时刻，可以调节负载两端的电压。

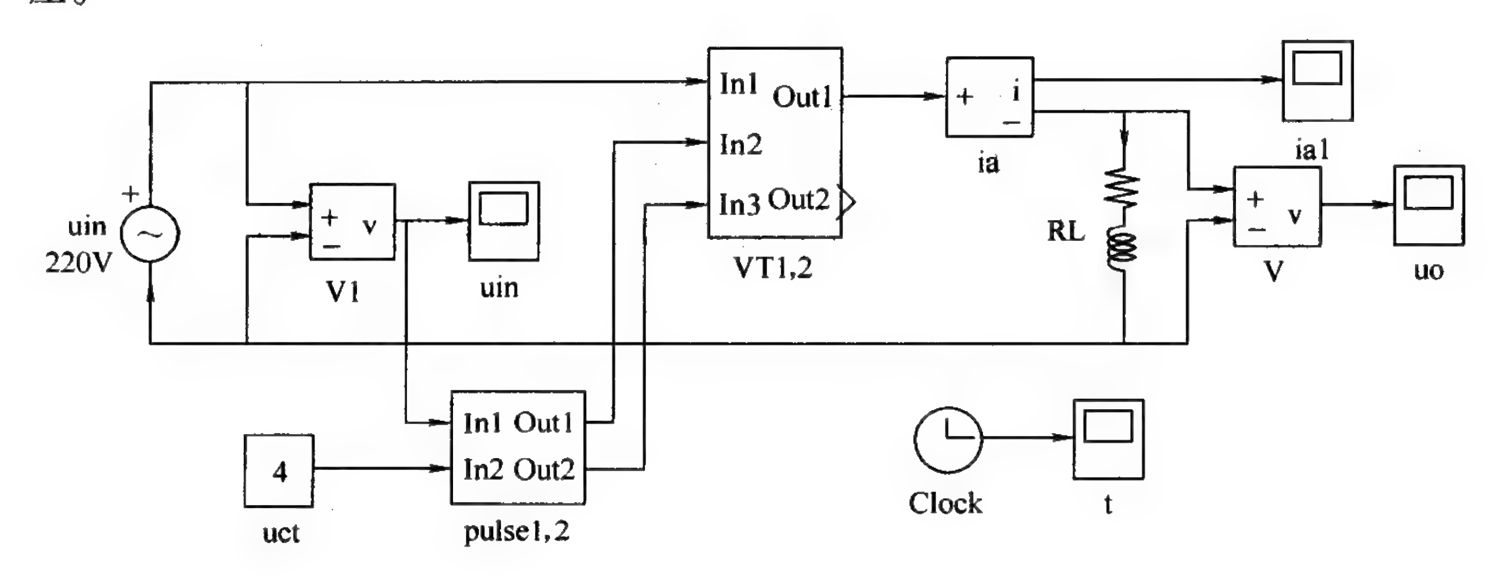


图 5-50　单相交流调压电路仿真模型

单相交流电压电路的仿真模型如图 5-50 所示。模型由交流电源、反并联晶闸管模块（VT1，2)、触发模块（pulse1，2)、阻感负载（RL）和观测示波器组成。其中双向晶闸管开关模块由分支电路组成（见图 5-51)，分支电路的 In1 端和 Out1 端分别是晶闸管双向开关的输入和输出端，In2 端和 In3 端分别是晶闸管 VT1 和 VT2 的触发端，Out2 端用于观测晶闸管 VT1 两端的电压和电流。

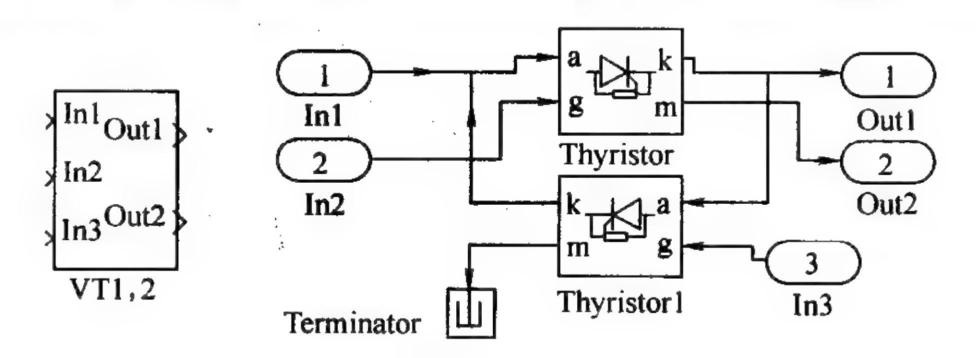


图 5-51　反并联晶闸管分支电路

交流调压晶闸管控制角 α 的移相范围是 180°，$\alpha=0°$的位置定在电源电压过零的时刻。在阻感负载时按控制角与负载阻抗角［$\varphi=\arctan(L/R)$］的关系，电路有两种工作状态。

1．$\varphi\leqslant\alpha\leqslant180°$时

调压器输出电压和电流的正负半周是不连续的，在这范围内调节控制角，

负载的电压和电流将随之变化。

2. $0°\leqslant\alpha\leqslant\varphi$ 时

调压器输出处于失控状态，即虽然控制角变化，但负载电压不变，且是与电源电压相同的完整正弦波。这是因为阻感负载电流滞后于电压，因此如果控制角较小，在一个晶闸管电流尚未下降到零前，另一个晶闸管可能已经触发（但不能导通），一旦电流下降到零，如果另一个晶闸管的触发脉冲还存在，则该晶闸管立即导通，使负载上电压成为连续的正弦波，出现失控现象。正因为如此交流调压器晶闸管必须采用后沿固定在 180°的宽脉冲触发方式，以保证晶闸管能正常触发。根据以上要求设计的交流调压器触发电路如图 5-52a 所示。

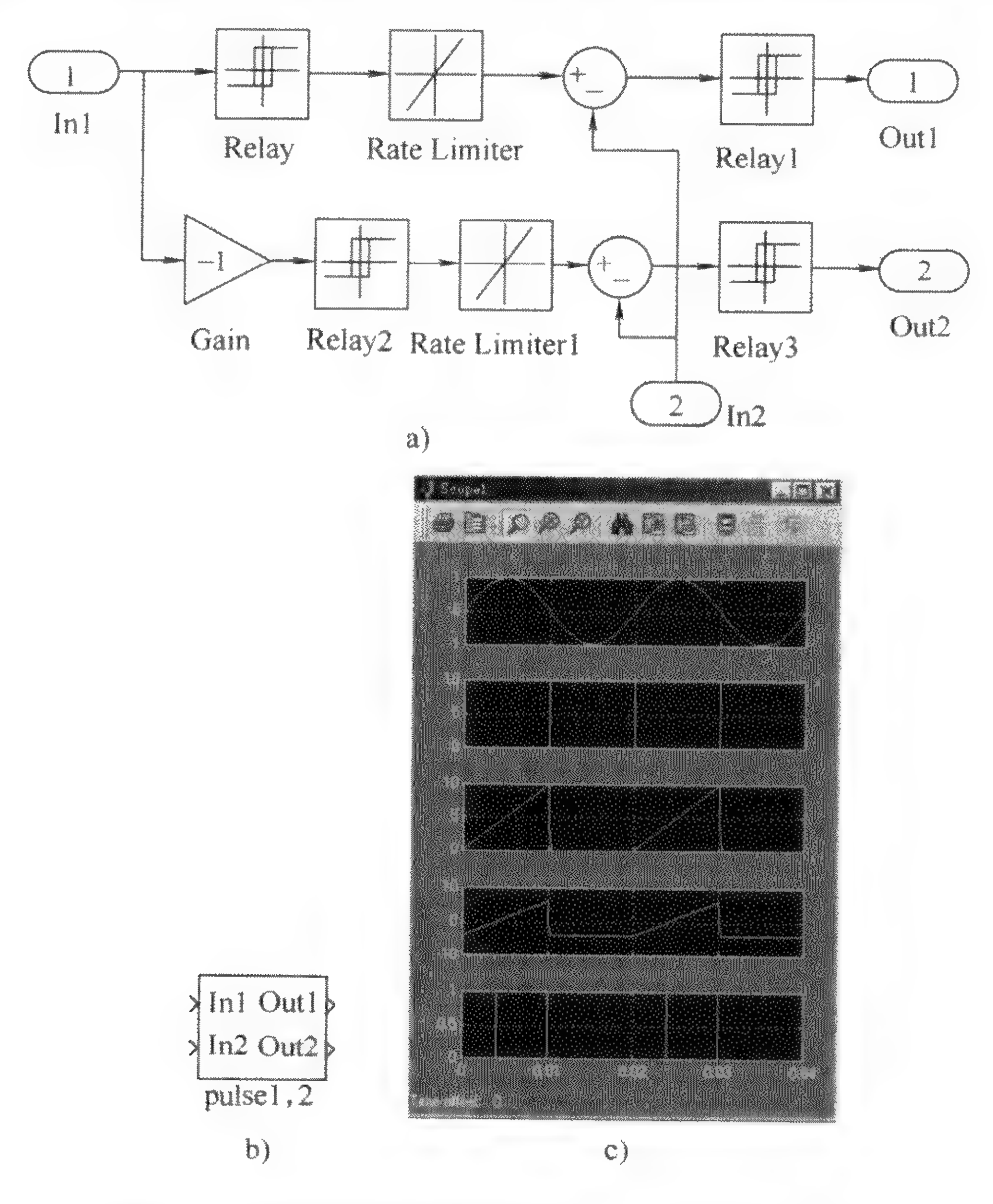


图 5-52　交流调压器触发电路、分支模块和波形

交流调压器的触发电路由同步、锯齿波形成和移相控制等环节组成。电路的输入端 In1 是同步电压输入端，同步电压经延迟 Relay 环节产生与同步电压正半周等宽的方波，该方波经斜率设定（Rate Limiter）产生锯齿波，锯齿波与移相控制电压（输入端 In2）叠加调节锯齿波的过零点，再经延迟 Relay1 产生前沿可调，后沿固定的晶闸管触发脉冲，触发电路各部分的输出波形如图 5-52c 所示。

波形从上至下分别为同步信号、半周等宽方波、锯齿波、叠加移相控制控制和触发信号。触发电路的下半部分用于产生负半周晶闸管的触发脉冲。

【例 5-5】 观察交流调压器在 $\alpha \geqslant \varphi$ 和 $\alpha \leqslant \varphi$ 两种情况下输出电压和电流的波形，负载 R 的值为 1Ω，L 的值为 10mH。

仿真步骤如下：

（1）按图 5-37 绘作交流调压器仿真模型。

（2）设置模块参数见表 5-4，移相控制电压 U_{ct} 可在 0 ~ 10V 之间任意调节。

表 5-4 交流调压器主要参数设置

模块	电源 uin	Relay、Relay2		Rate Limiter、Rate Limiter1		Relay1、Relay3	
参数设置	220V	Switch On point	eps	Rising slew rate	1000	Switch On point	eps
	50Hz	Switch Off point	eps	Fallingslew rate	-1e8	Switch Off point	eps
		Output when on	10			Output when on	1
		Output when off	0			Output when off	0

（3）设置仿真参数。仿真时间为 0.04s，仿真算法采用 ode15s。

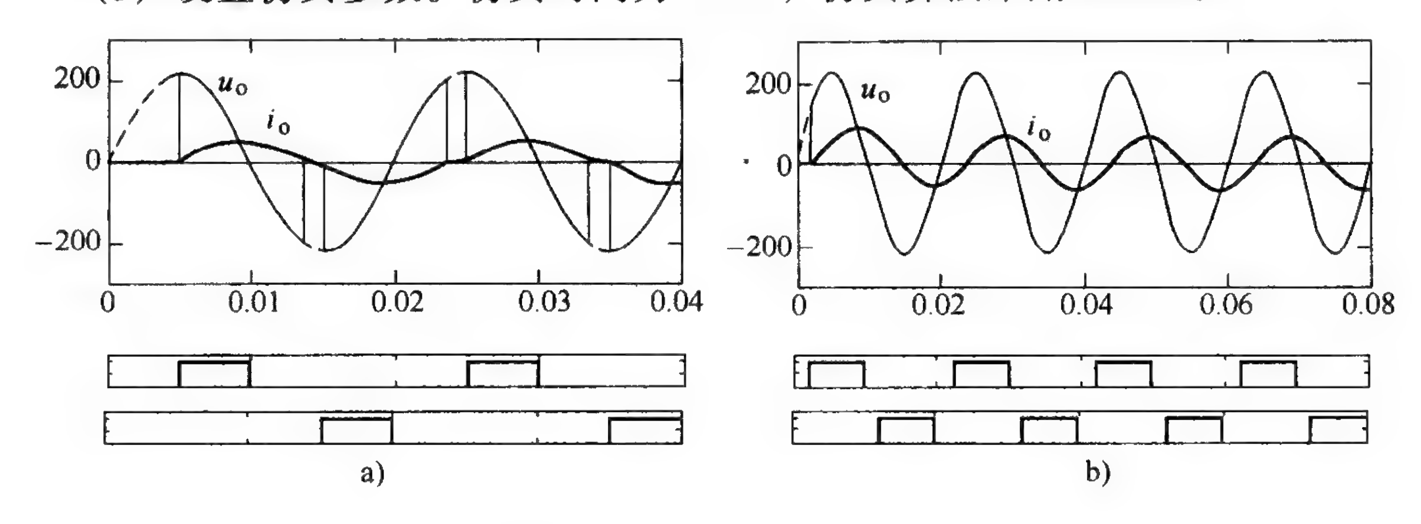


图 5-53 单相交流调压器仿真波形

a）$U_{ct} = 5V$ b）$U_{ct} = 2V$

（4）启动仿真，仿真结果如图 5-53 所示。其中图 5-53a 所示为移相控制电压 $U_{ct} = 5V$ 时的调压器输出电压、电流波形。由于晶闸管的斩波作用并且控制角较大，输出电压、电流波形的正负半周是不连续的，使输出电压有效值减小，实现了对交流电压的调节。图 5-53b 所示为 $U_{ct} = 2V$ 时的调压器输出电压、电流波形，由于控制角较小（$0° \leqslant \alpha \leqslant \varphi$），输出电压和电流为完整的正弦波，交流调压器失去调压控制作用。比较电流和晶闸管的触发脉冲，可以看到在正向电流尚未为零前反向晶闸管的触发脉冲已经到来，如果触发脉冲很窄，在正向电流到零时反向晶闸管的触发脉冲已经消失，则反向晶闸管就不能导通，因此需要采用宽脉冲触发方式，且脉冲的后沿应设在 180°的位置，和交流调压器的移相范围相适应。在电流的第一个周期，因为电感电流较大，电感储能较多正向晶闸

管的导通时间较长，使反向晶闸管的实际导通时间滞后于触发时间，因此电流的正半周大于负半周，经两个周期的调节达到正负半周相等的平衡状态。图中方波为正反向晶闸管的触发脉冲。

5.4.2 三相交流调压器仿真

三相交流调压器有星形联结和三角形联结的多种方案。其中星形联结又有无中线和有中线两种电路，三角形联结有线路控制、支路控制和中点控制的不同电路。这里主要研究两种常用的无中线星形联结和支路控制三角形联结线路。

1. 无中线星形联结三相交流调压器

无中线星形联结三相交流调压器的原理电路如图 5-54 所示，其仿真模型如图 5-55 所示。该模型实际上由三个单相交流调压电路组成，图中 VT1，2、VT3，4 和 VT5，6 分别为双向晶闸管开关模块，pulse1，2、pulse3，4 和 pulse5，6 是相应晶闸管的触发模块，双向晶闸管开关模块和触发模块结构均与单相交流调压的模型相同。为了观察方便在触发模块的移相控制输入端接入了一个控制角与移相控制电压 U_{ct} 的变化函数 $U_{ct}=10\times u_1/180$，式中的 u_1 为控制角（度），由常数模块@设定。

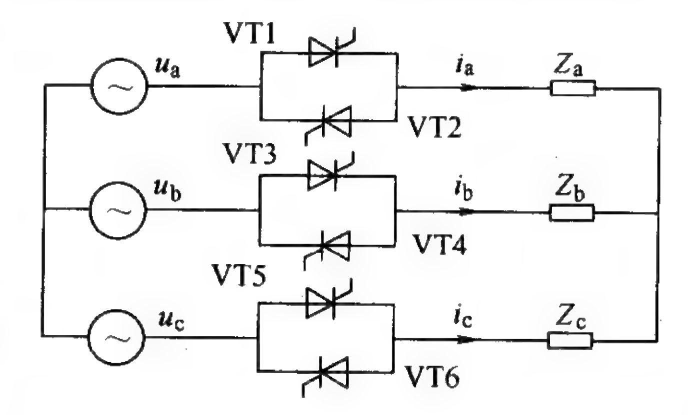


图 5-54 无中线星形联结三相交流调压器

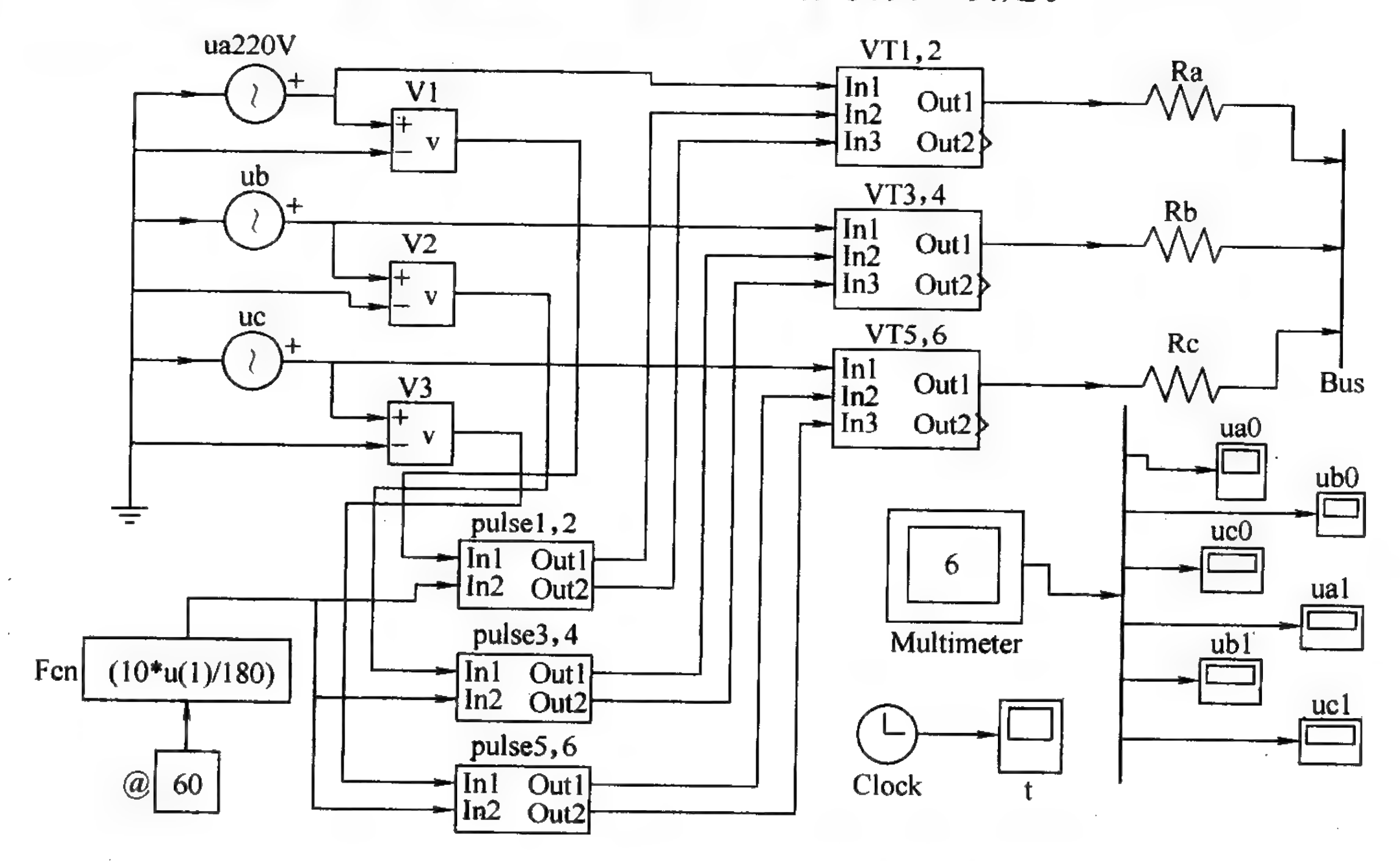


图 5-55 无中线星形联结三相交流调压器仿真模型

在电阻负载时三相交流调压器的输出电压仿真结果如图 5-56 所示。其中图 5-56a 所示为 $\alpha=30°$时调压器三相输出电压波形，图 5-56b 所示为 $\alpha=60°$时调压器三相输出电压波形，为了便于比较，图中以虚线给出了对应的电源相电压波形。从 $\alpha=30°$的三相波形中可以看到，在调压器三相的各相中都有一个晶闸管导通的区间，输出电压与电源相电压相同；在三相中只有两相有晶闸管导通的区间，输出电压（相电压）应为导通两相线电压的 1/2。随着控制角的增加，同时有三个晶闸管导通的区间逐步减小，到 $\alpha\geqslant60°$时，任何时间都只有两相有晶闸管导通，导通时输出相电压等于导通两相线电压的 1/2（见图 5-56b）。三相调压器输出电压较正弦波有较大畸变，使谐波增加，这可以用谐波分析模块分析。

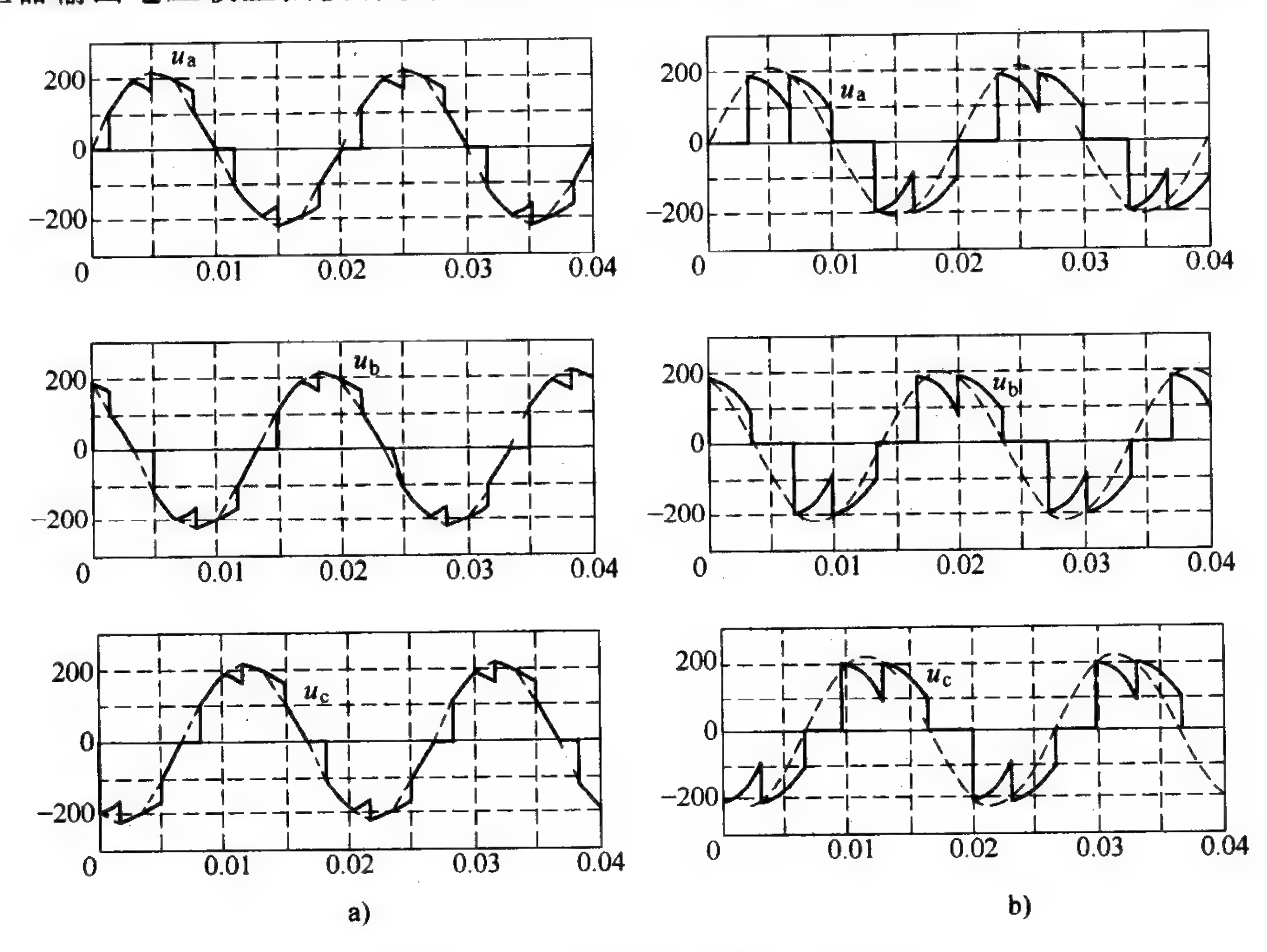


图 5-56　三相交流调压器输出电压波形

a）$\alpha=30°$　b）$\alpha=60°$

2. 支路控制三角形联结三相交流调压器

支路控制三角形联结交流调压器常用于动态无功补偿器中（见图 5-57）。动态无功补偿器由固定电容器和晶闸管控制的电抗器并联支路组成，通过晶闸管控制电感支路电流 i_L 而调节无功补偿装置的补偿电流 i_C 大小。其中，晶闸管控制三相电抗器的连接如图 5-58 所示，这是三角形联结的支路控制型三相交流调压电路。现对三相晶闸管控制的电感支路进行仿真，观察电感支路电流与晶闸

管控制角的关系。仿真模型如图 5-59 所示，设交流电源相电压为 220V，电感量为 2mH 。在 $\alpha=120°$和 150°时仿真结果如图 5-60 所示。

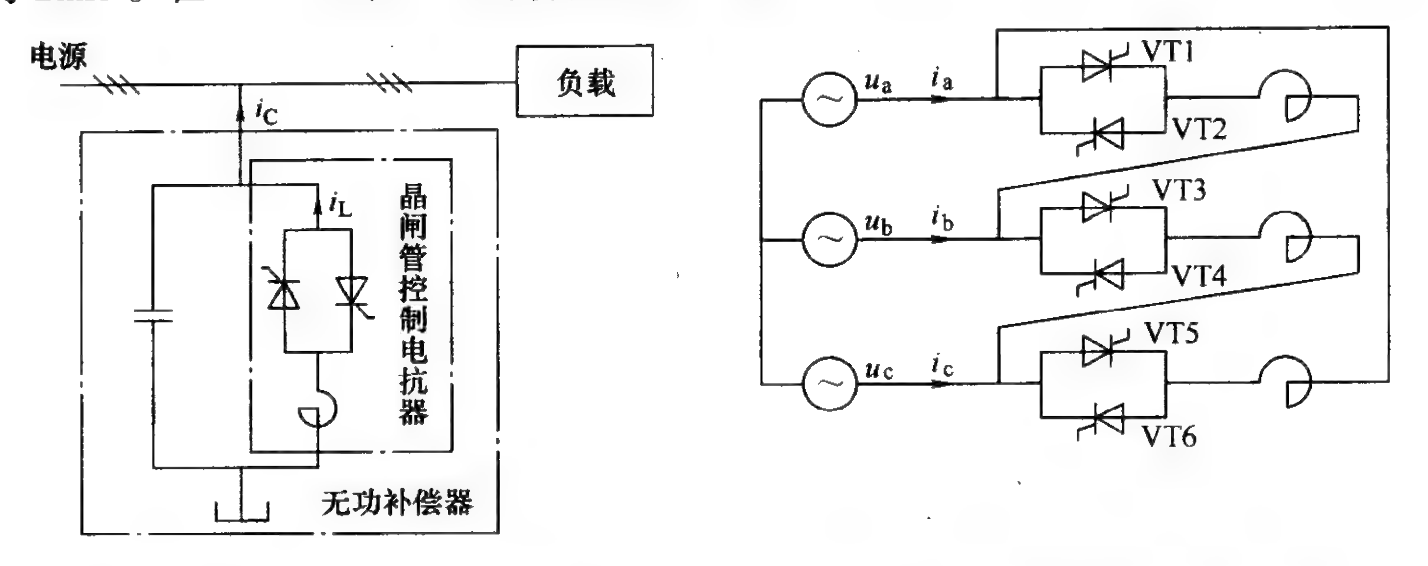


图 5-57　动态无功补偿器　　　　图 5-58　晶闸管控制三相电抗器

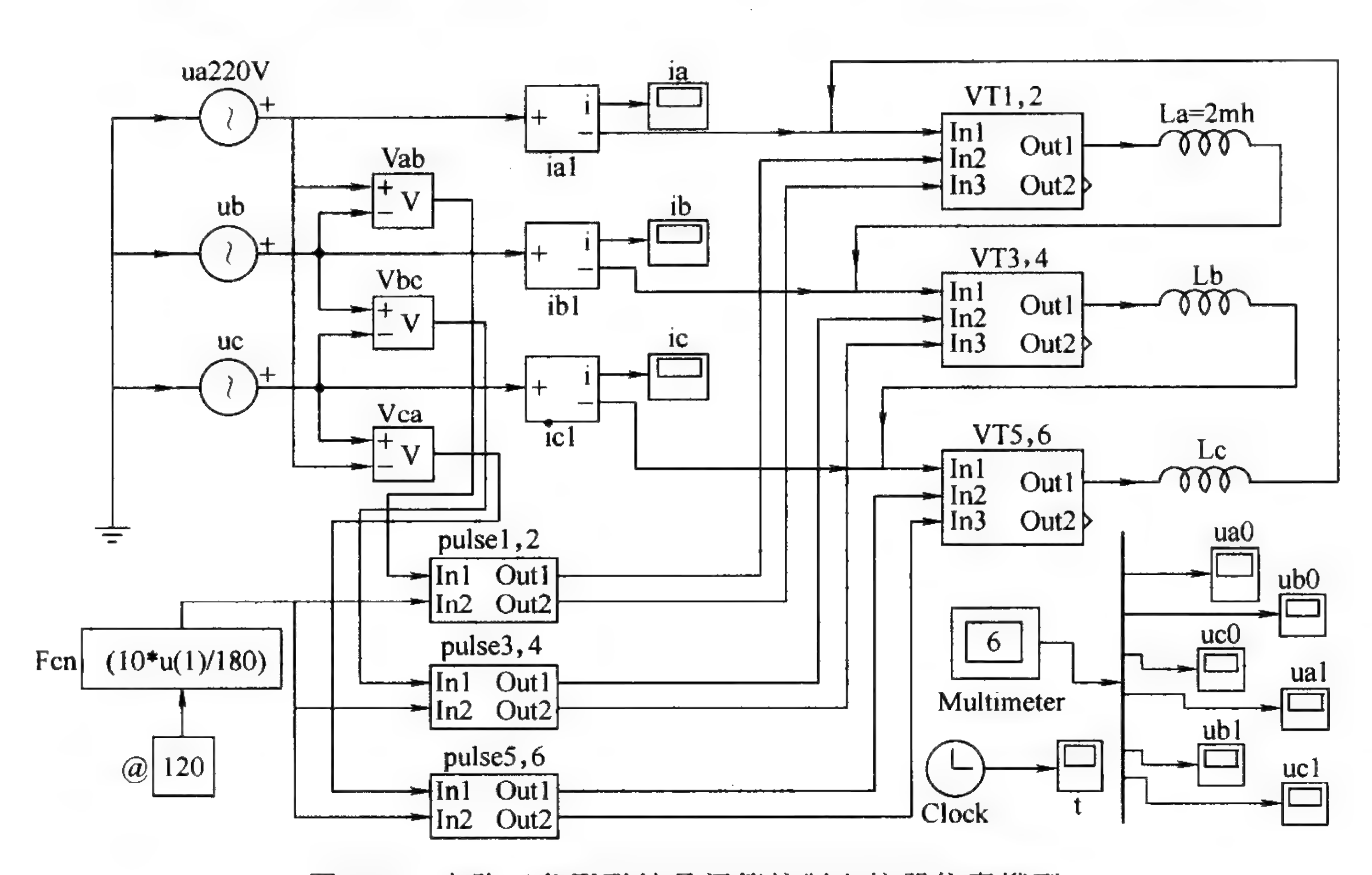


图 5-59　支路三角形联结晶闸管控制电抗器仿真模型

在图 5-60 中给出了各相线电流的波形，并画上各相相电压以便比较，从图中可以看出电流滞后于电压 90°，随控制角的增加，电流减小，电抗器提供的感性无功减小，而无功补偿装置向电网提供的容性无功量增加

$$Q=Q_C-Q_L$$

式中，Q 为无功补偿装置向电网提供的容性无功量，Q_C为固定电容的无功，Q_L为晶闸管控制电抗器提供的感性无功。

通过晶闸管调节电抗器电流，可以实现无功补偿装置补偿量的连续调节。其中图 5-60a 所示的电流波形反映了装置在零状态启动时的电流冲击情况，图 5-60b 中只给出了稳态的电流波形。通过仿真可以直观地研究线路无功补偿量与 LC 参数的关系和控制相关问题。

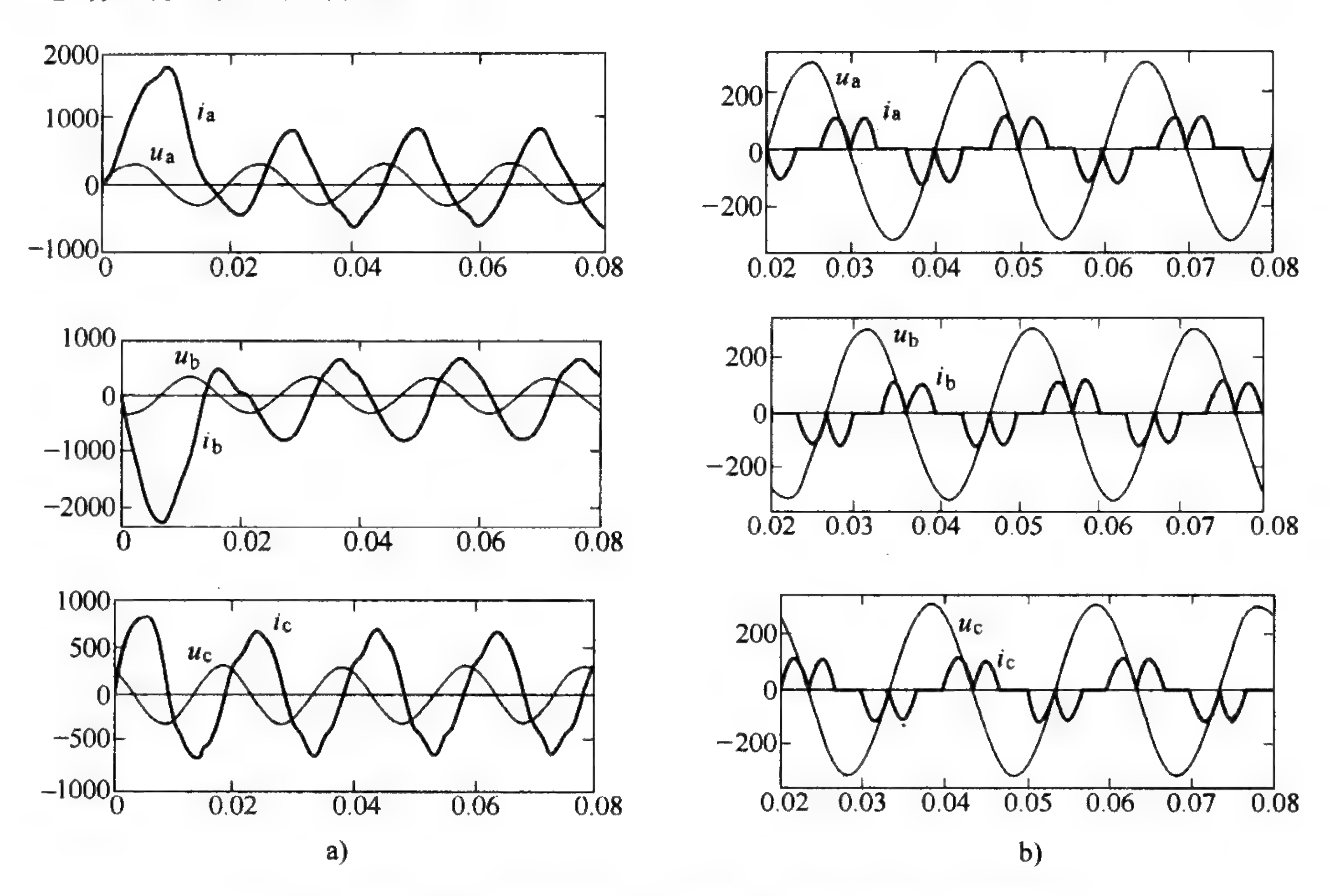


图 5-60　支路三角形联结晶闸管控制电抗器电流和电源波形

a）$\alpha = 120°$　b）$\alpha = 150°$

5.4.3　交-交变频电路仿真

交-交变频的基本原理是通过电力电子器件的开关控制，截取三相工频电源电压的各个片断，重新拼装组合成一个新的交流电压。交-交变频的主电路一般由两组反并联的晶闸管整流电路组成（见图 5-61），整流电路常采用三相桥式。当正组整流器工作时在负载 Z 上得到正向电流，反组整流器工作时在负载上得到反向电流，改变正反两组桥的切换频率，在负载上就可以得到不同频率的交流电，实现变频。如果改变晶闸管的控制角，则输出电压随之改变即实现了调压的控制。如果在负载电压的一周期中控制角保持不变（等 α 控制），则输出电压是带锯齿的方波，为了使输出电压接近正弦波，则要求在一周期中晶

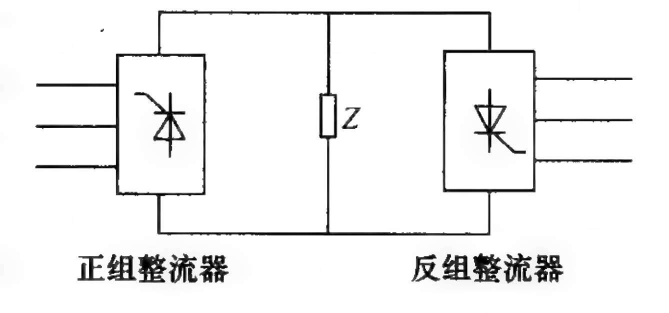


图 5-61　单相交-交变频电路

闸管控制角按一定的规律变化，常用的控制方法有余弦交点法和叠加三次谐波的交流偏置法等。下面通过仿真来研究余弦交点法，并观察采用余弦交点法调制的交-交变频效果。

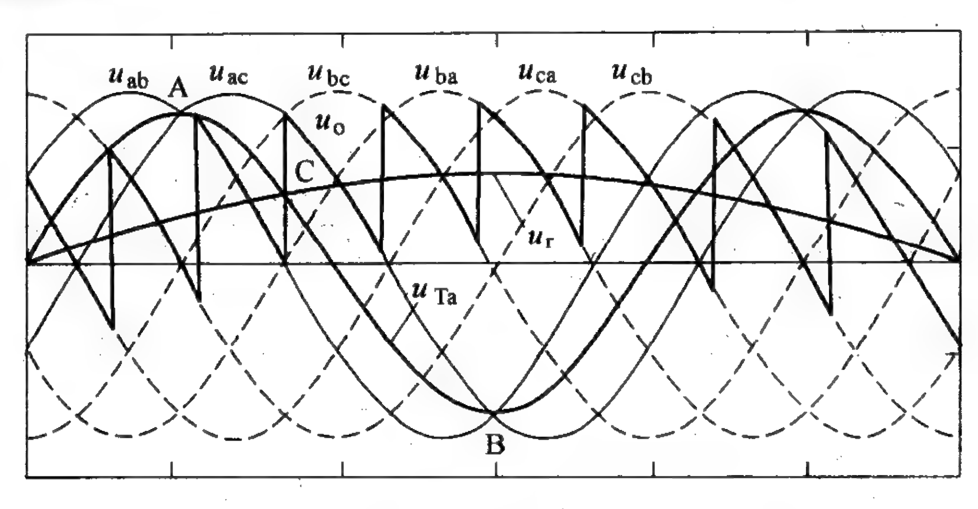


图 5-62　余弦交点法基本原理

余弦交点法的基本原理是，当交-交变频器输出电压波形的相邻两段与调制的目标正弦波的差值相等时，则是交交变频器晶闸管的切换时刻。现以图 5-62 进一步说明，图中 u_o 是交-交变频器输出电压波形，u_r 是调制的目标正弦波，u_o 是由线电压 u_{ab}、u_{ac}、u_{bc}、u_{ba}、u_{ca}、u_{cb}的各个片断组成的。现研究从 u_{ab} 到 u_{ac} 片断的换流，在换流的时刻，C 应有 $u_r - u_{ab} = u_{ac} - u_r$，在这以前 $u_r - u_{ab} < u_{ac} - u_r$，在这以后 $u_r - u_{ab} > u_{ac} - u_r$，且换流点的轨迹是 $u_{Ta} = (u_{ab} + u_{ac})/2$，从

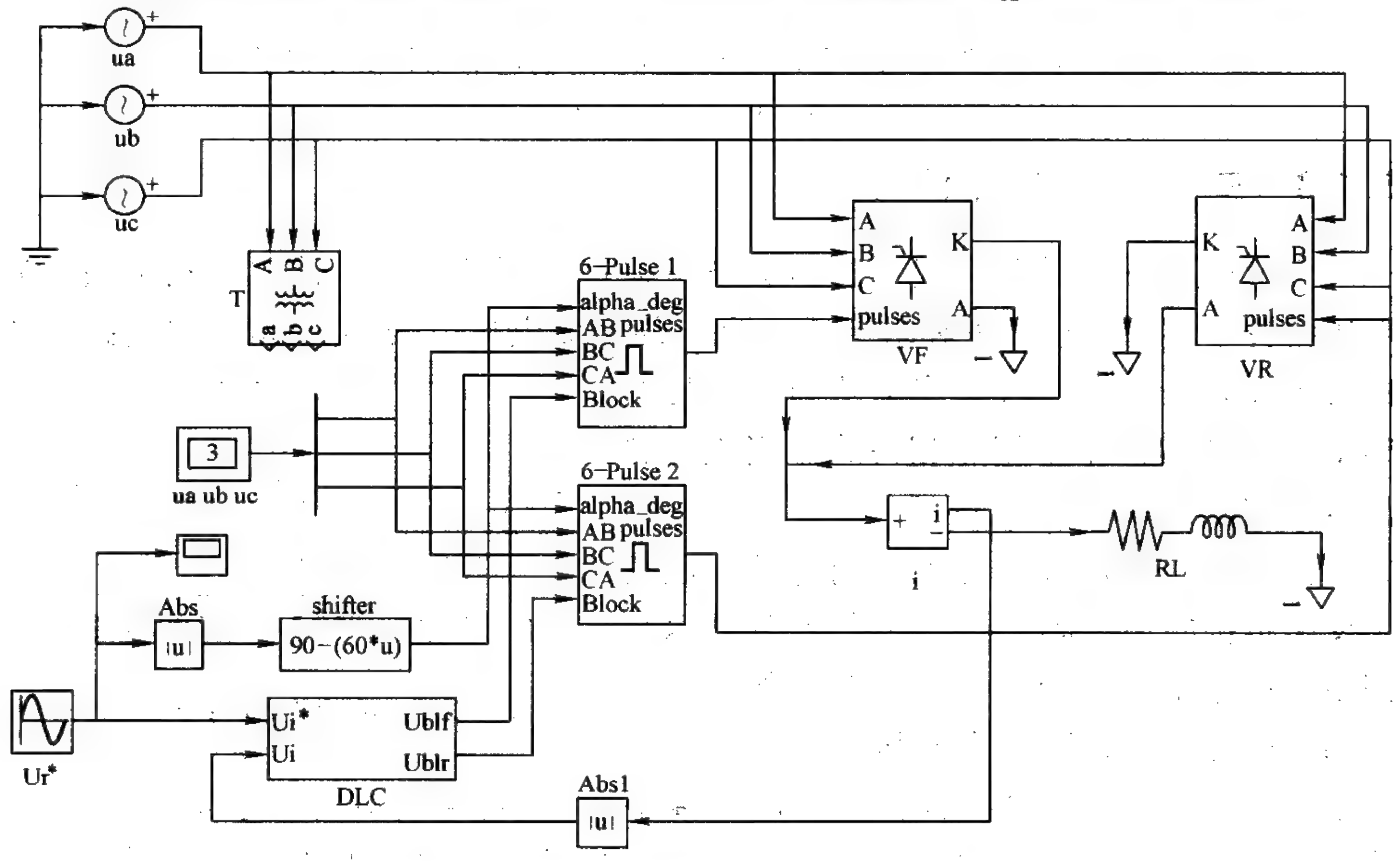


图 5-63　单相交-交变频器仿真模型

图中可以看到这是落后于 u_{ab}30°的相电压 u_a，且 $u_{ab}=u_{ac}$的正半周交点 A 是允许两相换流的起点，现设为 $\alpha=0°$的位置；在 $u_{ab}=u_{ac}$的负半周交点 B 是允许两相换流的终点，即为 $\alpha=180°$的位置。如果将坐标轴线放在 $\alpha=0°$位置上，则 u_a 是一条余弦曲线，余弦曲线的下降沿 AB 与调制电压 u_r 的交点则决定了 u_{ab}与 u_{ac}（晶闸管 VT6 与 VT2）的换流时刻，其他换流时刻可以类推。

根据以上原理，交-交变频器的主电路可以用两组反并联的晶闸管整流器组成，与直流电机可逆调速系统的主电路类似。设计的单相交-交变频器仿真模型如图 5-63 所示。模型中两组三相桥 VF、VR 作反并联连接，两个触发电路（6-Pulse1 和 6-Pulse2）的同步信号来自同步变压器 T，同步变压器 T 采用 Y-Y_0 联结，触发器的 AB、BC、CA 输入端分别连接变压器 T 二次侧的 ua、ub、uc 三相，模型中是用多路测量仪检测变压器 T 二次侧的三相电压 ua、ub、uc。模型中两组三相桥采用逻辑无环流控制方式，逻辑控制器 DLC（见图 6-26）的输出信号 Ublf、Ublr 分别连接触发器的 Block 端，一般交-交变频器要求逻辑切换的“死区”小于 1ms，因此逻辑控制器 DLC 取消了开放延时。逻辑控制器的输入分别是交流调制信号 Ur* 和 RL 负载的电流，并根据 Ur* 信号的极性和电流的有无，确定两组整流器的工作状态。交流调制信号 Ur* 经绝对值变换和移相控制后连接触发器的 alpha_deg 端。改变正弦交流电源 Ur* 的频率和幅值，交-交变频器的输出电压的频率和幅值作相应的变化。本模型中 Ur* 的幅值最大值取“1”，对晶闸管交-交变频器，其输出频率一般在 0～1/2 工频之间。

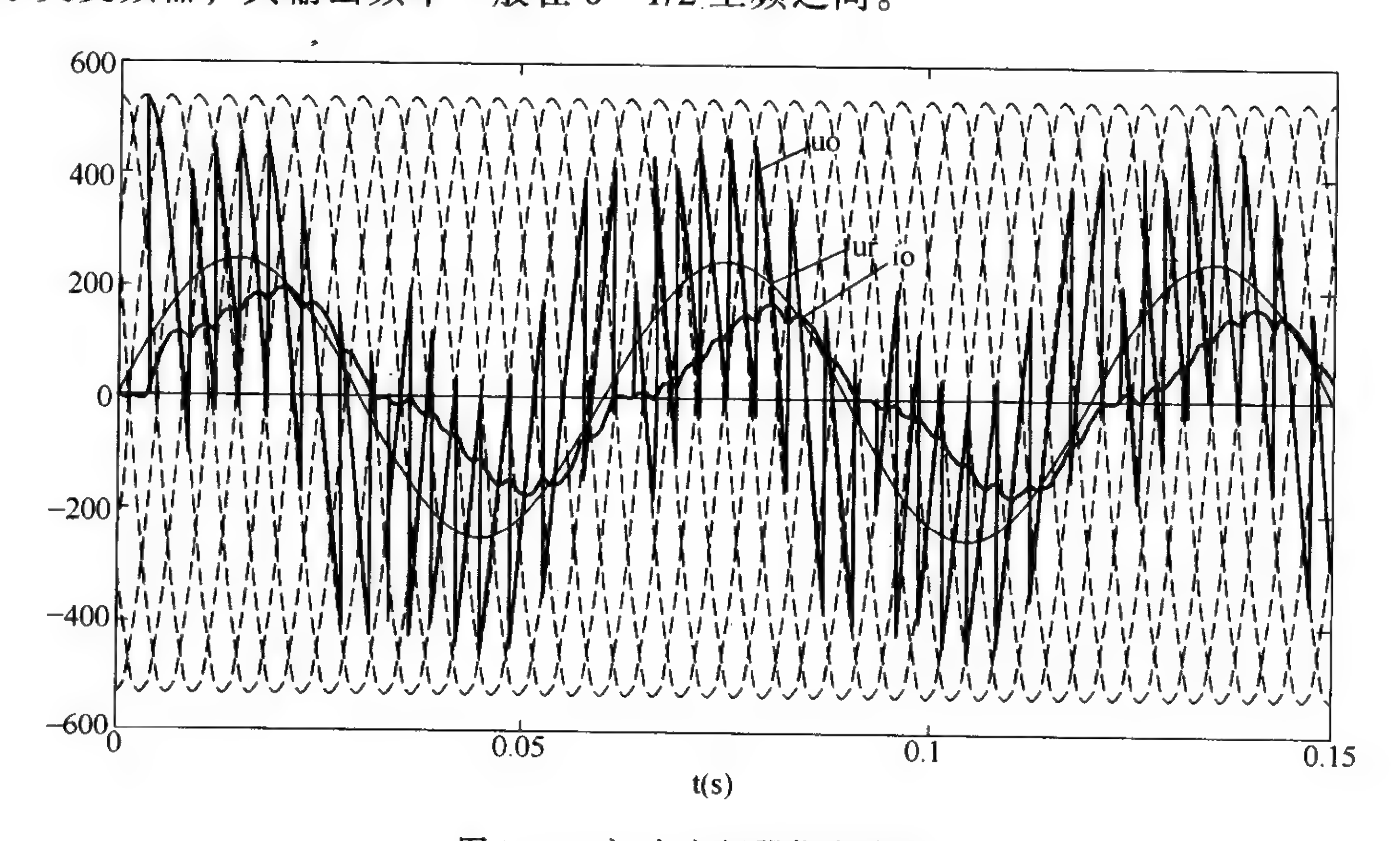


图 5-64　交-交变频器仿真波形

图 5-64 所示为单相交-交变频器，在 Ur^* 为 1/3 工频、幅值为 1 时的仿真结果。图中，uo 为输出电压波形，io 为输出电流波形，ur 为输出电压波形的基波分量。从图中可以看到交-交变频器输出电压是由三相电源电压的各个片断组成的，含有较多的谐波成分，对感性负载电流滞后于电压，在电流过零时存在逻辑切换的“死区”，死区的大小与逻辑控制器的延时有关。图 5-65 所示分别为逻辑控制器的转矩极性 UT 和零电流 UI 信号波形，以及输出的逻辑切换信号 Ublf、Ublr 波形。图 5-66 是交-交变频器输出波形的谐波分析，从频谱上看到输出波形含有较复杂的谐波成分。

由单相交-交变频器模型可以很方便地组成三相交-交变频器模型，这里不再赘述。

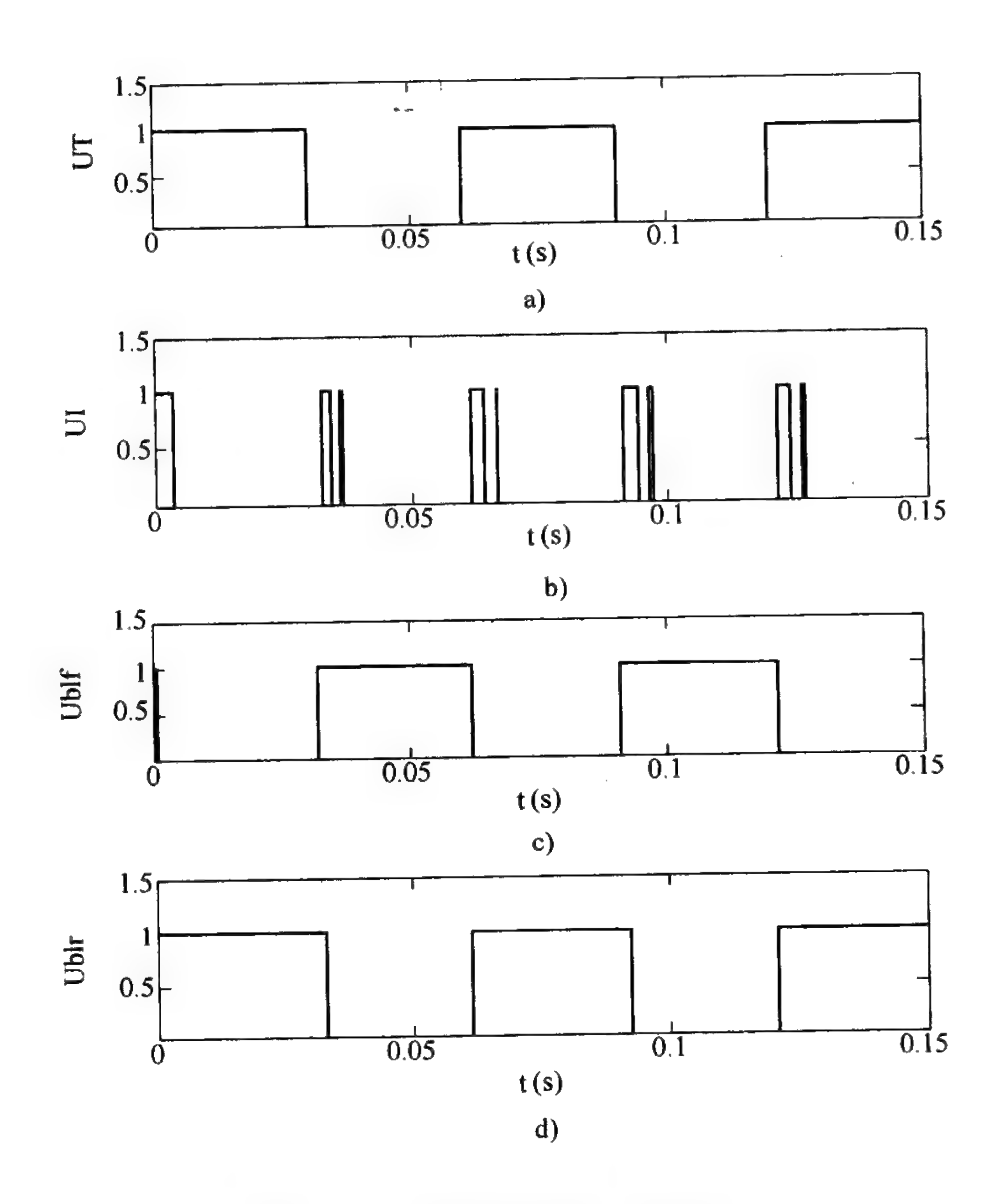


图 5-65 逻辑控制器输入输出信号

a) 转矩极性 b) 零电流信号 c) 输出信号 Ublf d) 输出信号 Ublr

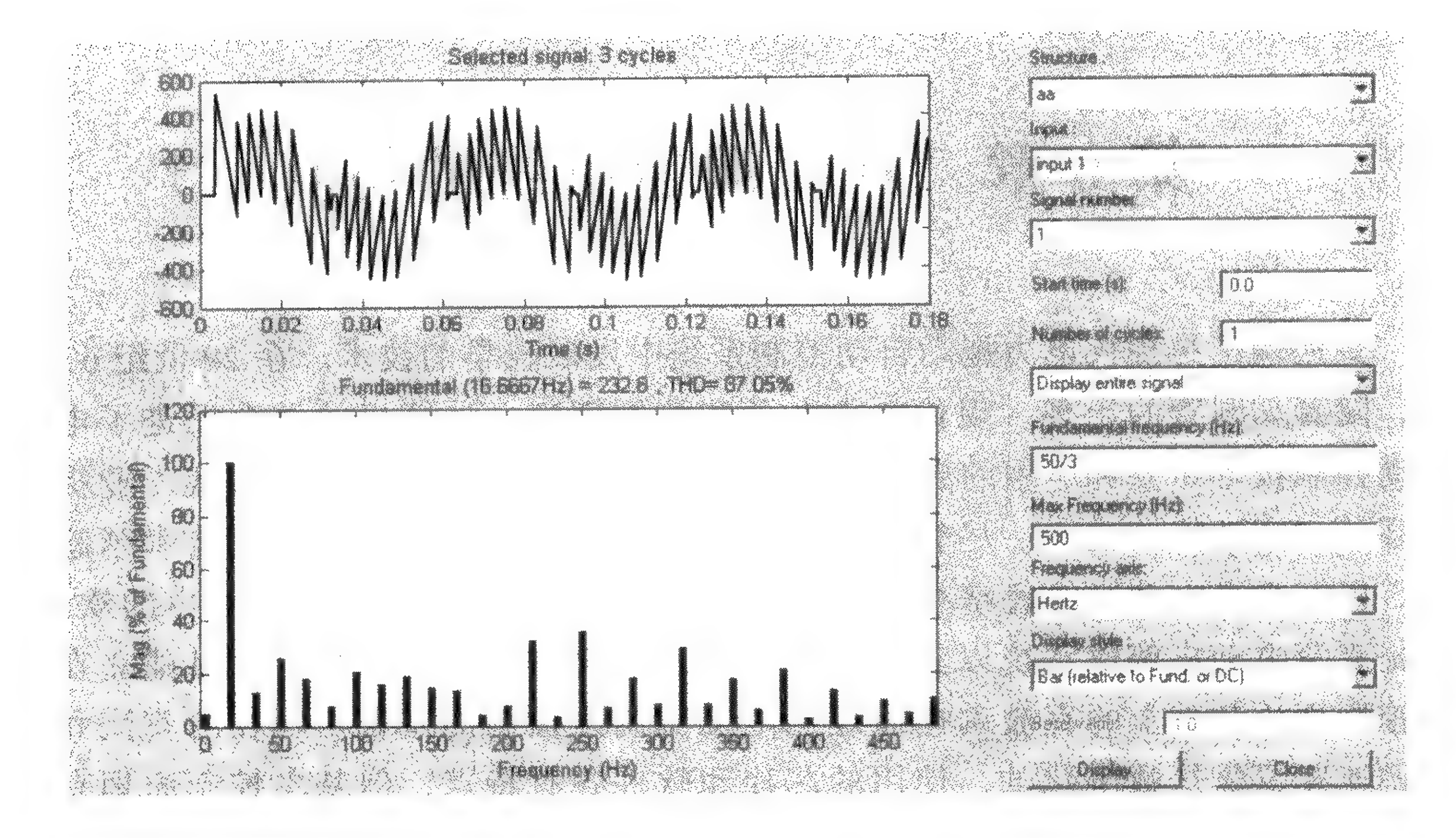


图 5-66　交-交变频器的谐波分析

第6章　直流调速系统的仿真

直流调速是现代电力拖动自动控制系统中发展较早的技术。在20世纪60年代，随着晶闸管的出现，现代电力电子和控制理论、计算机的结合促进了电力传动控制技术研究和应用的繁荣。晶闸管-直流电动机调速系统为现代工业提供了高效、高性能的动力。尽管目前交流调速的迅速发展，交流调速技术越趋成熟，以及交流电动机的经济性和易维护性，使交流调速广泛受到用户的欢迎。但是直流电动机调速系统以其优良的调速性能仍有广阔的市场，并且建立在反馈控制理论基础上的直流调速原理也是交流调速控制的基础。现在的直流和交流调速装置都是数字化的，使用的芯片和软件各有特点，但基本控制原理有其共性，本章主要通过仿真研究直流调速的基本原理和调速性能。

6.1　直流电动机开环调速系统仿真

直流开环调速系统的电气原理如图6-1所示。直流电动机电枢由三相晶闸管整流电路经平波电抗器L供电，并通过改变触发器移相控制信号 U_C 调节晶闸管的控制角，从而改变整流器的输出电压实现直流电动机的调速。该系统的仿真模型如图6-2所示。

在仿真中为了简化模型，省略了整流变压器和同步变压器，整流器和触发同步使用同一交流电源，直流电动机励磁由直流电源直接供电。触发器（6-Pulse

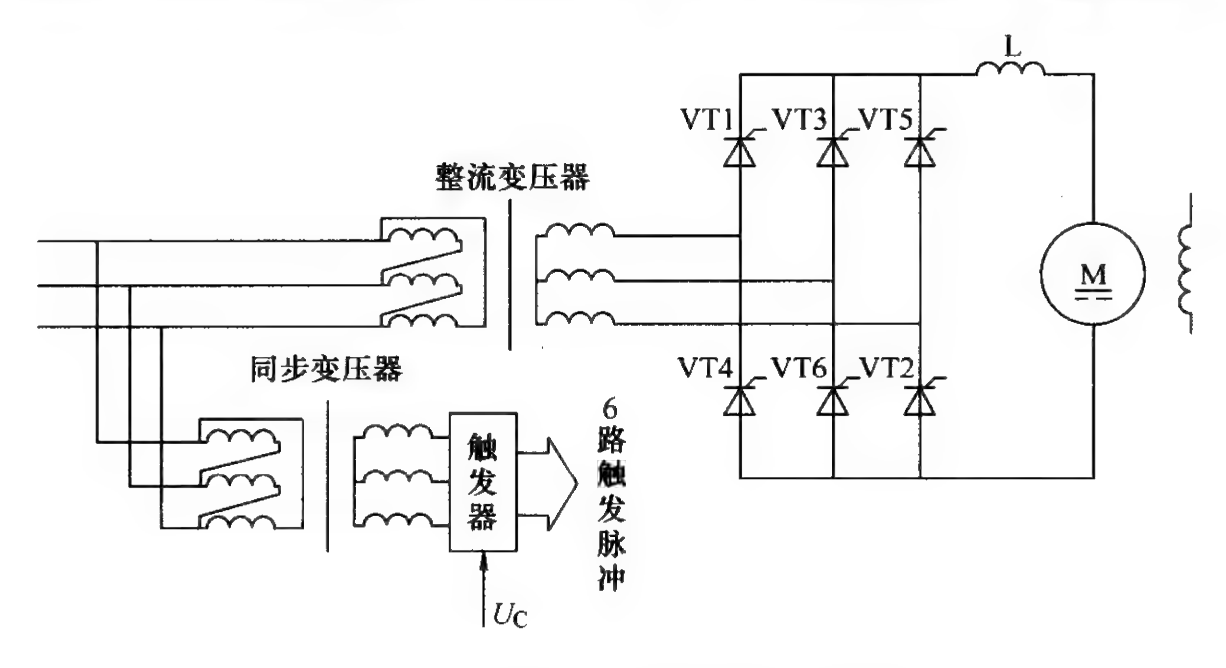


图6-1　直流开环调速系统电气原理

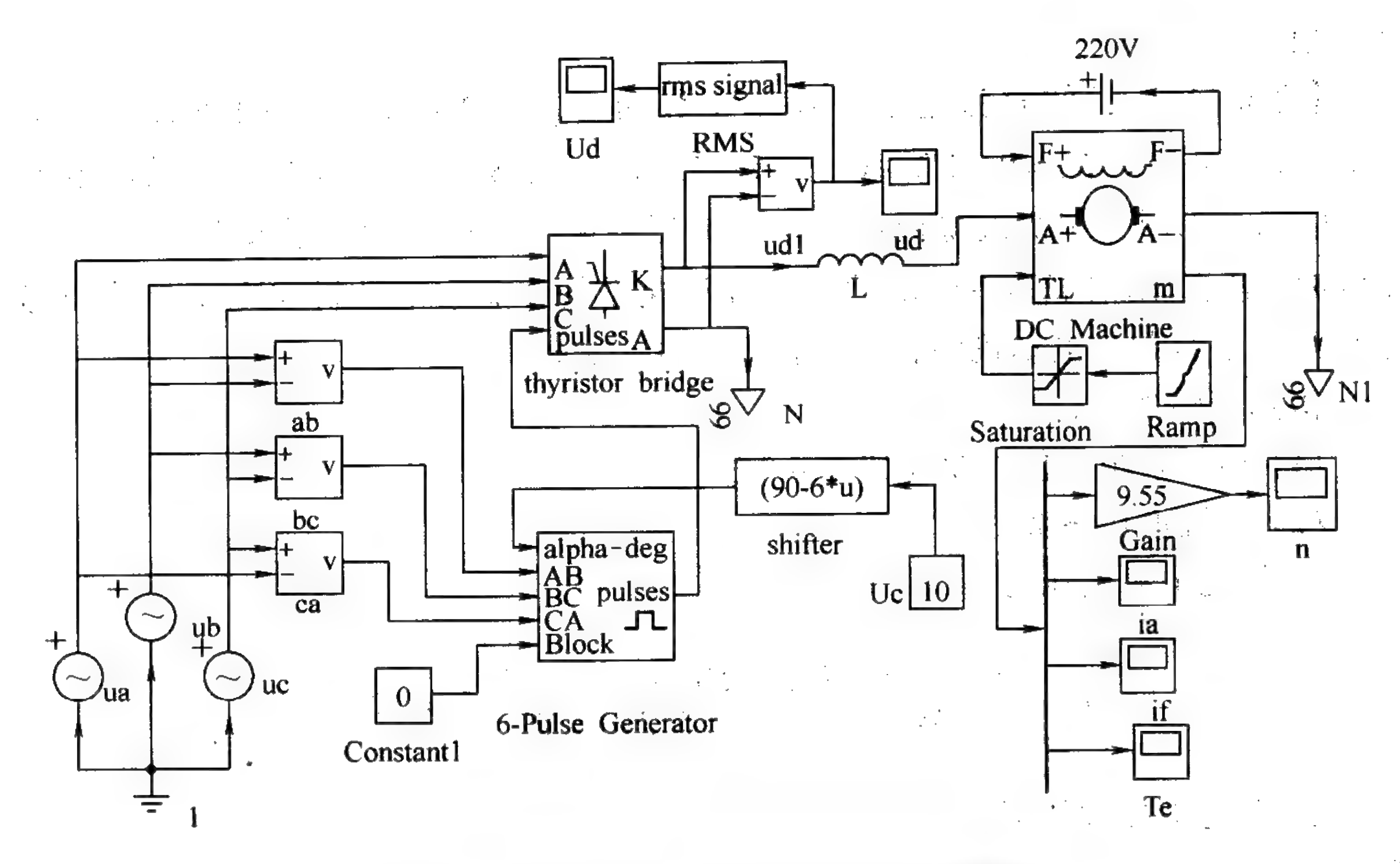


图 6-2 直流电动机开环调速系统的仿真模型

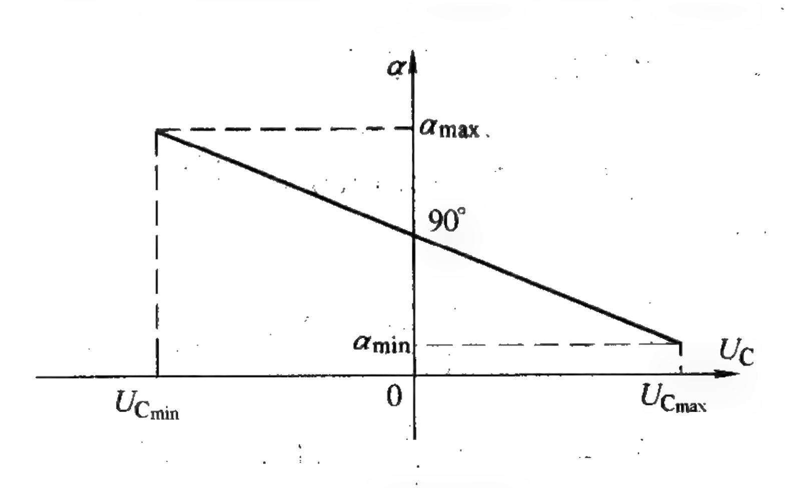


图 6-3 移相特性

Generator）的同步电压连接参见本书相关部分内部。触发器的控制角（alpha_deg 端）通过了移相控制环节（shifter），移相控制模块的输入是移相控制信号 U_C（图 6-2 中 U_C），输出是控制角，移相控制信号 U_C 由常数模块设定。移相特性如图 6-3 所示。移相特性的数学表达式为

$$\alpha = 90° + \frac{90° - \alpha_{min}}{U_{C_{max}}} U_C$$

在本模型中取 $\alpha_{min} = 30°$，$U_{Cm} = \pm 10V$，所以 $\alpha = 90° + 6U_C$。在电动机的负载转矩输入端 TL 接入了斜坡（Ramp）和饱和（Satutration）两个串联模块，斜坡模块用于设置负载转矩上升速度和加载的时刻，饱和模块用于限制负载转矩的

最大值。

【例 6-1】 已知直流电动机额定参数为 $U_{nom}=220V$，$I_{nom}=136A$，$n_{nom}=1460r/min$，4 极，$R_a=0.21\Omega$，$GD^2=22.5N\cdot m^2$。励磁电压 $U_f=220V$，励磁电流 $I_f=1.5A$。采用三相桥式整流电路，整流器内阻 $R_{rec}=1.3\Omega$。平波电抗器 $L_p=200mH$。仿真该晶闸管-整流电动机开环调速系统，观察电动机在全压起动和起动后加额定负载时电动机的转速、转矩和电流变化。

仿真步骤如下：

(1) 绘制系统的仿真模型如图 6-2 所示。

(2) 设置模块参数

1）供电电源电压为

$$U_2=\frac{U_{nom}+R_{rec}I_{nom}}{2.34\cos\alpha_{min}}=\frac{220+0.21\times136}{2.34\cos30^\circ}V=123V$$

2）电动机参数如下：

励磁电阻为 $R_f=U_f/I_f=220/1.5=146.7\Omega$

励磁电感在恒定磁场控制时可取 0。

电枢电阻 $R_a=0.21\Omega$，电枢电感由下式估算，即

$$L_a=\frac{19.1CU_{nom}}{2pn_{nom}I_{nom}}=\frac{19.1\times0.4\times220}{2\times2\times1460\times136}H=0.00021H$$

电枢绕组和励磁绕组互感 L_{af} 为

因为 $$C_e=\frac{U_{nom}-R_aI_{nom}}{n_{nom}}=\frac{220-0.21\times136}{1460}V\cdot min/r=0.132V\cdot min/r$$

$$K_E=\frac{60}{2\pi}C_e=\frac{60}{2\pi}\times0.132=1.26$$

所以 $$L_{af}=K_E/I_f=1.26/1.5=0.84H$$

电动机转动惯量为 $J=GD^2/4g=22.5/4\times9.8kg\cdot m^2=0.57kg\cdot m^2$

3）额定负载转矩为

$$T_L=9.55C_eI_{nom}=9.55\times0.132\times17.5N\cdot m=22N\cdot m$$

(3) 设置仿真参数。仿真算法采用 ode15s，仿真时间为 4s，电动机空载起动，起动 2.5s 后突加额定负载。

(4) 启动仿真并观察结果。仿真的结果如图 6-4 所示。其中图 6-4a 所示为整流器输出端的电压波形（局部），图 6-4b 所示为经平波电抗器后电动机电枢两端电压波形，该波形较整流器输出端的电压波形脉动减少了许多，电压平均值在 225V 左右符合设计要求。图 6-4c 和图 6-4d 所示为电动机电枢回路电流和转速变化过程，在全压直接起动情况下，起动电流很大，在 0.25s 左右起动电流下降为

零（空载起动），起动过程结束，这时电动机转速上升到最高值。在起动 0.5s 后加额定负载，电动机的转速下降，电流增加。图 6-4e 所示为电动机的转矩变化曲线，转矩曲线与电流曲线成比例。图 6-4f 给出了工作过程中电动机的转矩-转速特性曲线。通过仿真反映了开环晶闸管-直流电动机系统的空载起动和加载工作情况。

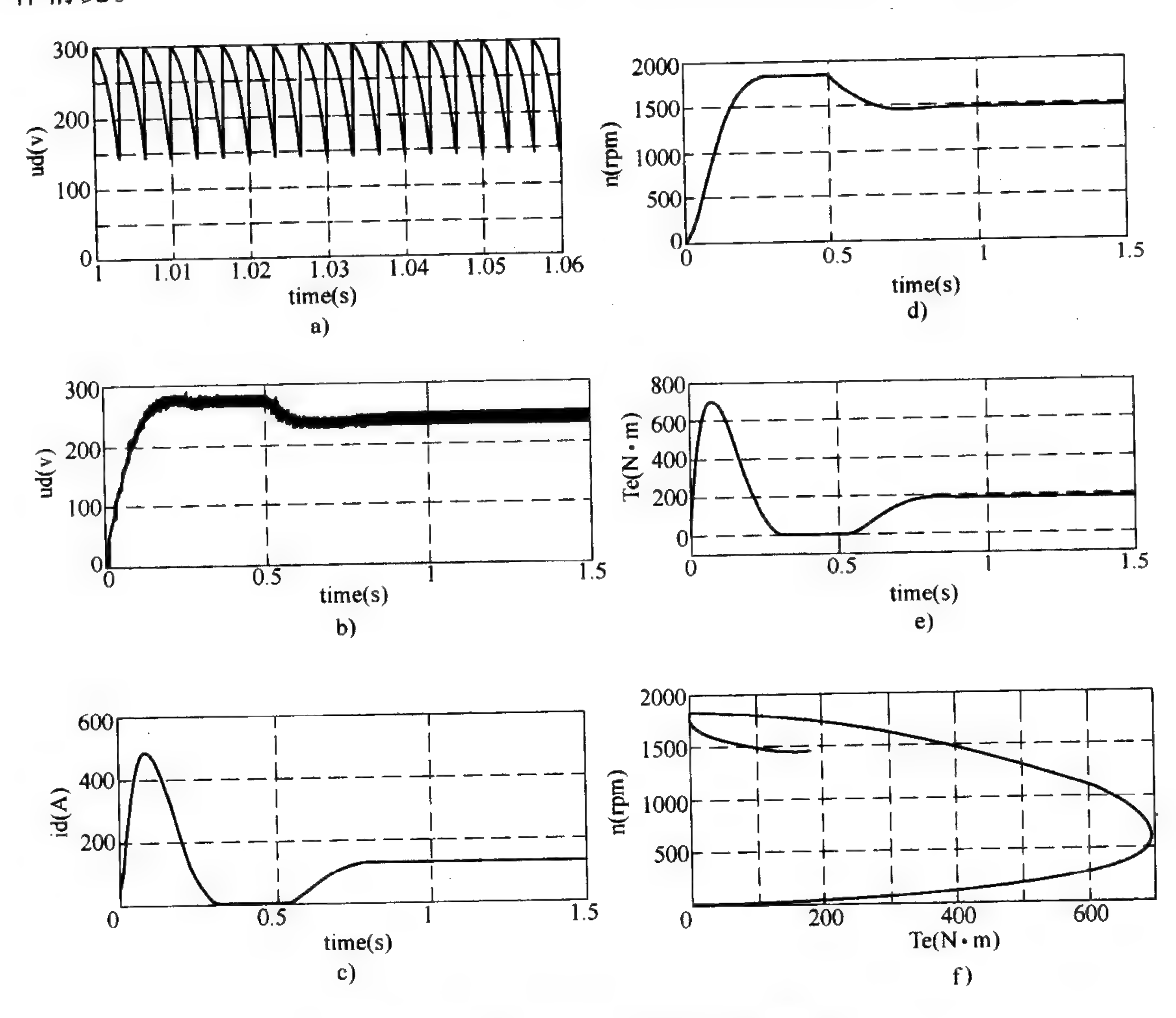


图 6-4　晶闸管-直流电动机系统仿真结果

a）整流器输出电压　b）电枢两端电压　c）电枢电流　d）电动机转速

e）电动机转矩曲线　f）转矩-转速特性

6.2　转速闭环控制的直流调速系统仿真

晶闸管-直流电动机系统可以通过调节晶闸管控制角改变电动机电枢电压实现调速，但是存在两个问题，第一，全压起动时，起动电流大。第二，转速随负载变化而变化，负载越大，转速降落越大，难以在负载变动时保持转速的稳

定，而满足生产工艺的要求。为了减小负载波动对电动机转速的影响可以采取带转速负反馈的闭环调速系统，根据转速的偏差来自动调节整流器的输出电压，从而保持转速的稳定。

6.2.1 带转速负反馈的有静差直流调速系统仿真

带转速负反馈的有静差直流调速系统的结构如图 6-5 所示。系统由转速给定环节 U_n^*，放大倍数为 K_p 的放大器、移相触发器 CF、晶闸管整流器和直流电动机 M、测速发电机 TG 等组成。该系统在电机负载增加时，转速将下降，转速反馈 U_n 减小，而转速的偏差 ΔU_n 将增大（$\Delta U_n = U_n^* - U_n$），同时放大器输出 U_C 增加，并经移相触发器使整流器输出电压 U_d 增加，电枢电流 I_d 增加，从而使电动机电磁转矩增加，转速也随之升高，补偿了负载增加造成的转速降。带转速负反馈的直流调速系统的稳态特性方程为

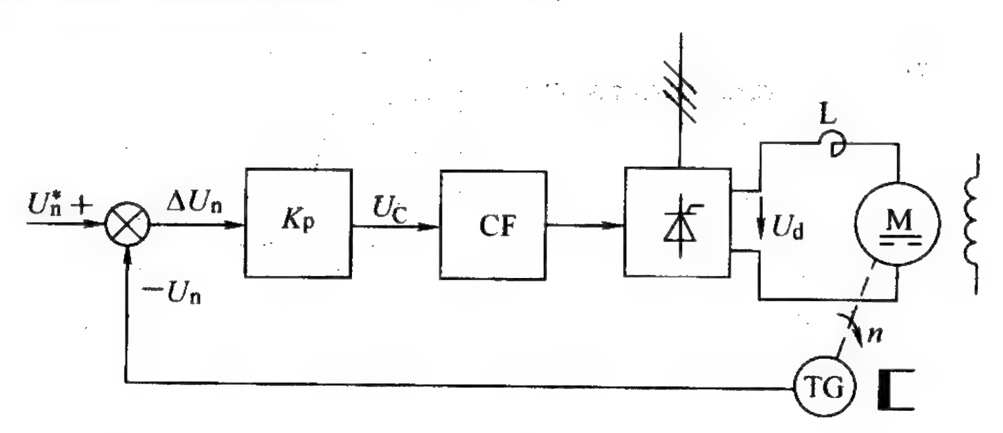


图 6-5 带转速负反馈的有静差直流调速系统的结构

$$n = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e\ (1+K)} - \frac{RI_d}{C_e\ (1+K)}$$

电动机转速降为

$$\Delta n = \frac{RI_d}{C_e\ (1+K)}$$

式中，$K = K_p K_s \alpha / C_e$，K_p 为放大器放大倍数；K_s 为晶闸管整流器放大倍数；C_e 为电动机电动势常数；α 为转速反馈系数；R 为电枢回路总电阻。

从稳态特性方程可以看到，如果适当增加放大器放大倍数 K_p，电机的转速降 Δn 将减小，电动机将有更硬的机械特性，也就是说在负载变化时，电动机的转速变化将减小，电动机有更好的保持速度稳定的性能。如果放大倍数过大，也可能造成系统运行的不稳定。

转速负反馈有静差调速系统的仿真模型如图 6-6 所示。模型在图 6-2 所示的开环调速系统的基础上增加了转速给定 un*、转速反馈 n-feed、放大器 Gain1 和反映放大器输出限幅的饱和特性模块 Saturation1，饱和限幅模块的输出是移相触

发器的输入 uc，其中转速反馈直接取自电动机的转速输出，没有另加测速发电机，取转速反馈系数 $\alpha = U_n^* / n_N$。

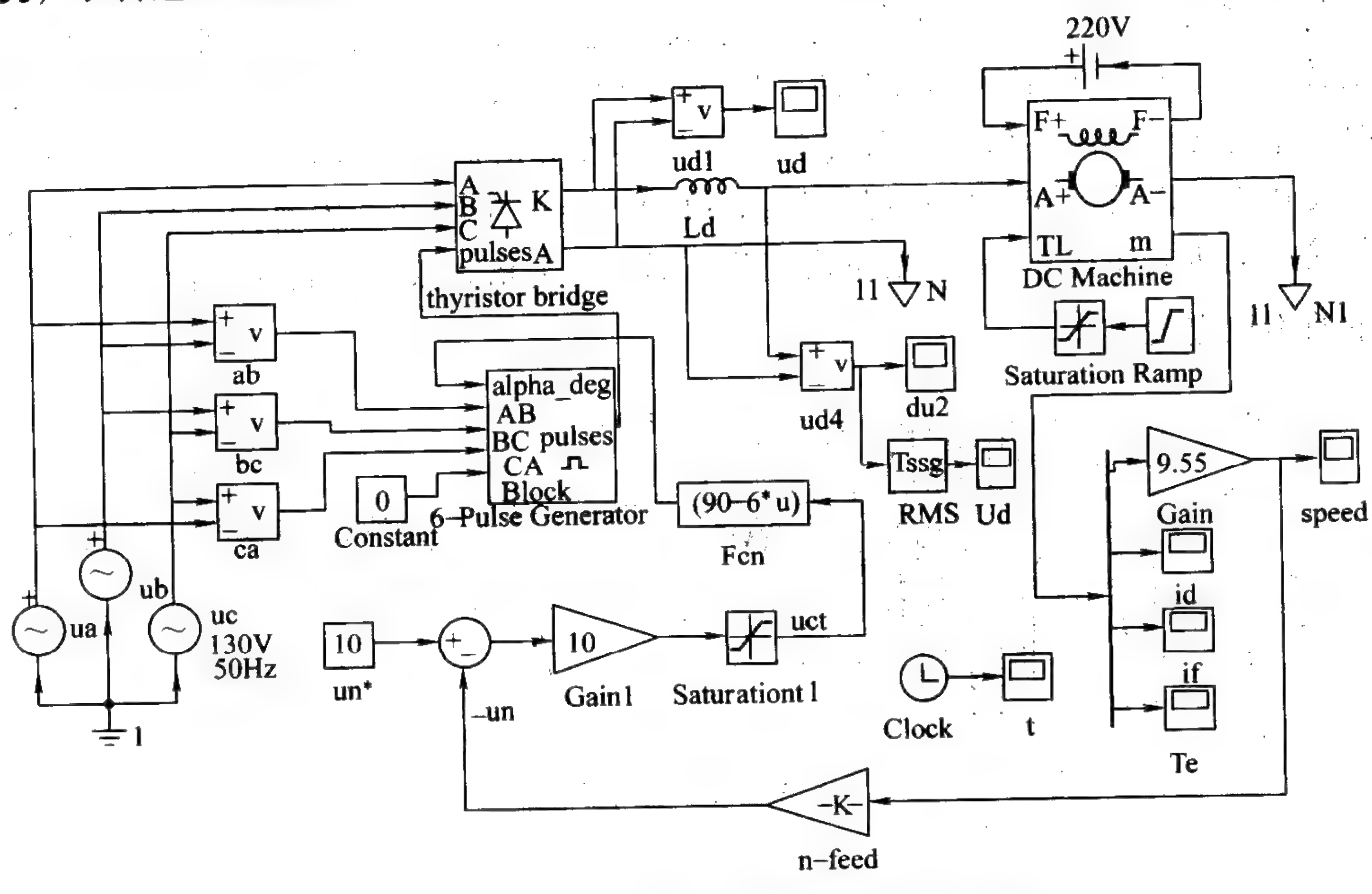


图 6-6　转速负反馈有静差直流调速系统仿真模型

【例 6-2】　在例 6-1 的基础上观察带转速负反馈系统，在不同放大器放大倍数时对转速变化的影响。

在额定转速 $U_n^* = 10$ 时，$K_p = 5$、10、20 时的转速响应曲线如图 6-7a 所示

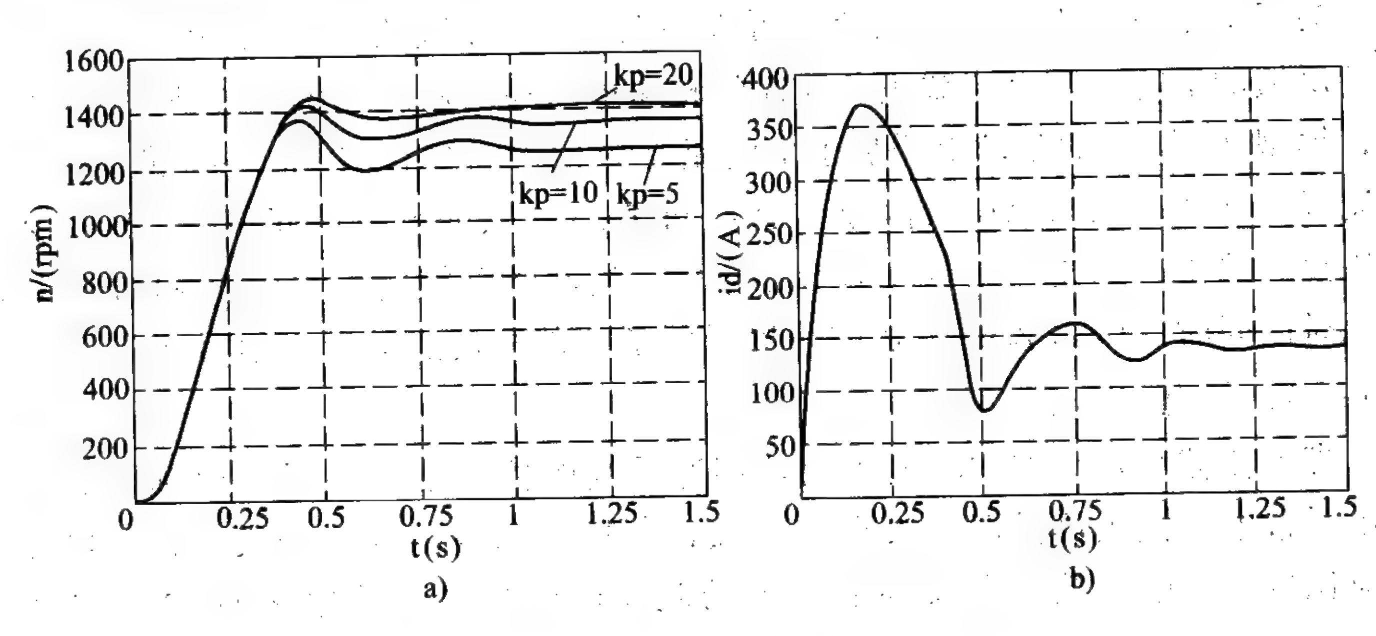


图 6-7　额定转速时的响应曲线

a) 不同放大倍数时的响应曲线　b) 电流响应曲线

(图中为 kp)，随着放大器放大倍数的增加，系统的稳态转速提高，即稳态转速降减小。图 6-7b 所示为 $K_p=10$ 时的电流响应波形，从波形可以看到由于没有电流的限制措施，在起动过程中电流仍很大可达 370A 左右。图 6-8b 所示为 1/2 额定转速 $U_n^*=5$ 时的转速响应曲线，以 $K_p=10$ 和 200 两种情况比较，在 $K_p=200$ 时，稳态转速降减小但是调节过程中的振荡次数增加，这从相应的移相控制信号变化也可以看到相同的情况（见图 6-8a），由于晶闸管整流器控制的非线性，其输出电压只能在 $0\sim U_{d_{max}}$ 范围内变化，尽管放大倍数很高，转速还没有出现严重的不稳定现象。

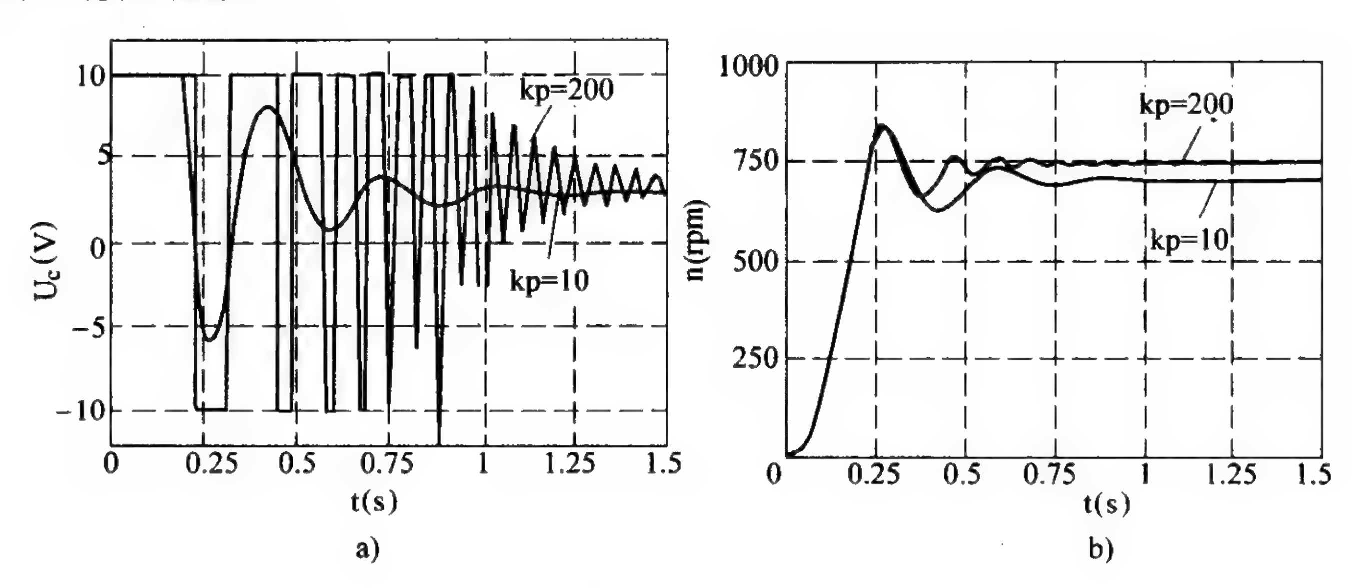


图 6-8　转速给定 $U_n^*=5$ 时的波形

a）移相控制信号　b）转速响应曲线

6.2.2　带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统仿真

为了限制电动机的起动电流，可以在转速负反馈系统的基础上增加电流截止负反馈的措施。带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统仿真模型如图 6-9 所示，模型在图 6-6 的基础上增加了由电流反馈 i-feed 和死区 Dead Zone 模块组成的电流截止环节。在电流反馈信号小于 Dead Zone 模块的死时区间值时，Dead Zone 模块没有输出，电流截止负反馈不起作用。当电流反馈信号大于 Dead Zone 模块的死时区间时，Dead Zone 模块的输出抵消了一部分转速的给定信号 U_n^*（图 6-9 中 un*），使电流减小。

带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统的仿真结果如图 6-10 所示，图中给出了带电流截止负反馈和没有电流截止负反馈两种情况电动机转速和电流的响应比较。带电流截止负反馈后系统的起动电流最高值从原来的 370A 减小到 260A 左右，但是起动的时间延长，调节电流反馈系数和死区模块的死时区间可以调节起动电流的最大值限制。

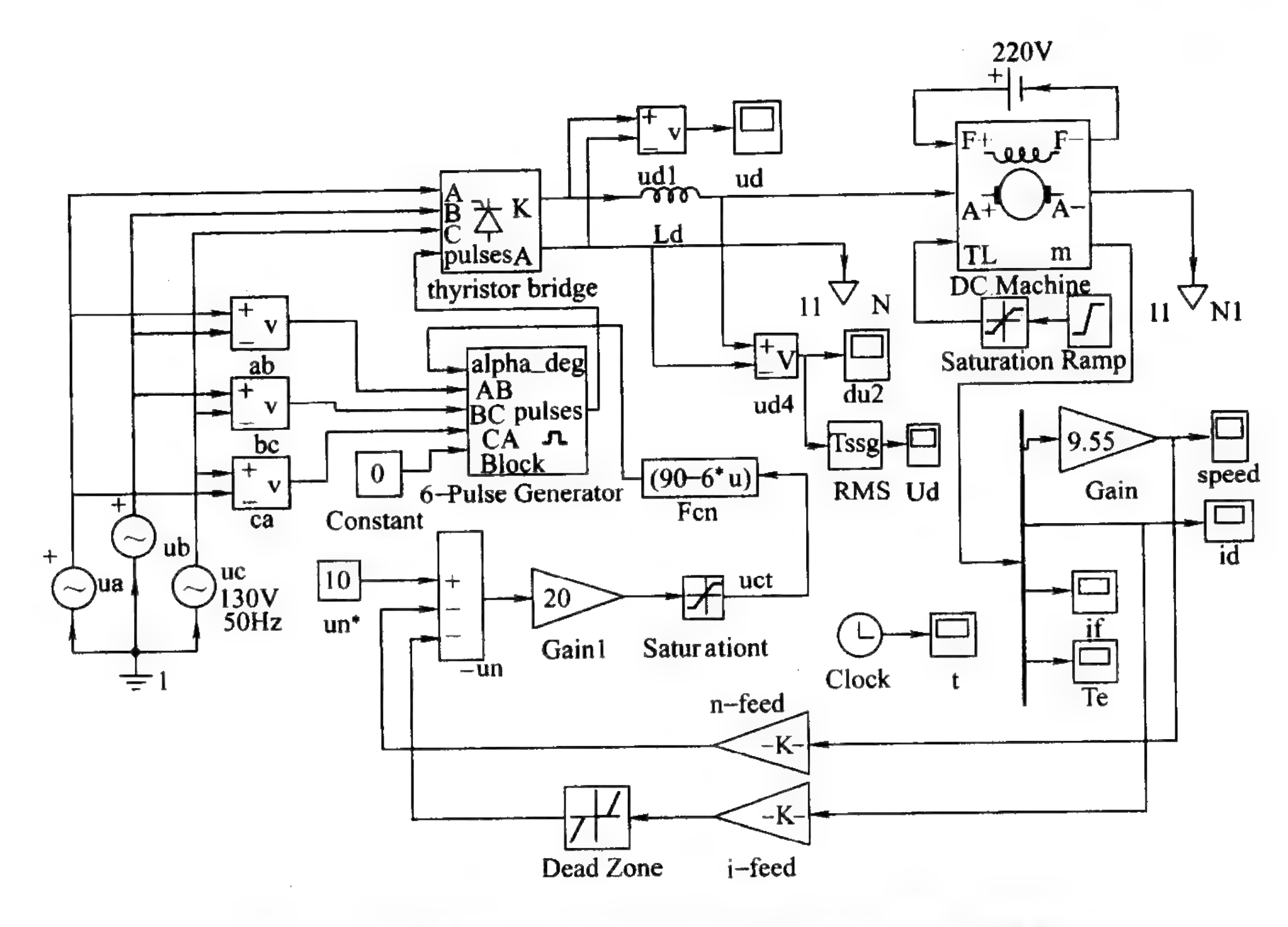


图 6-9　带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统仿真模型

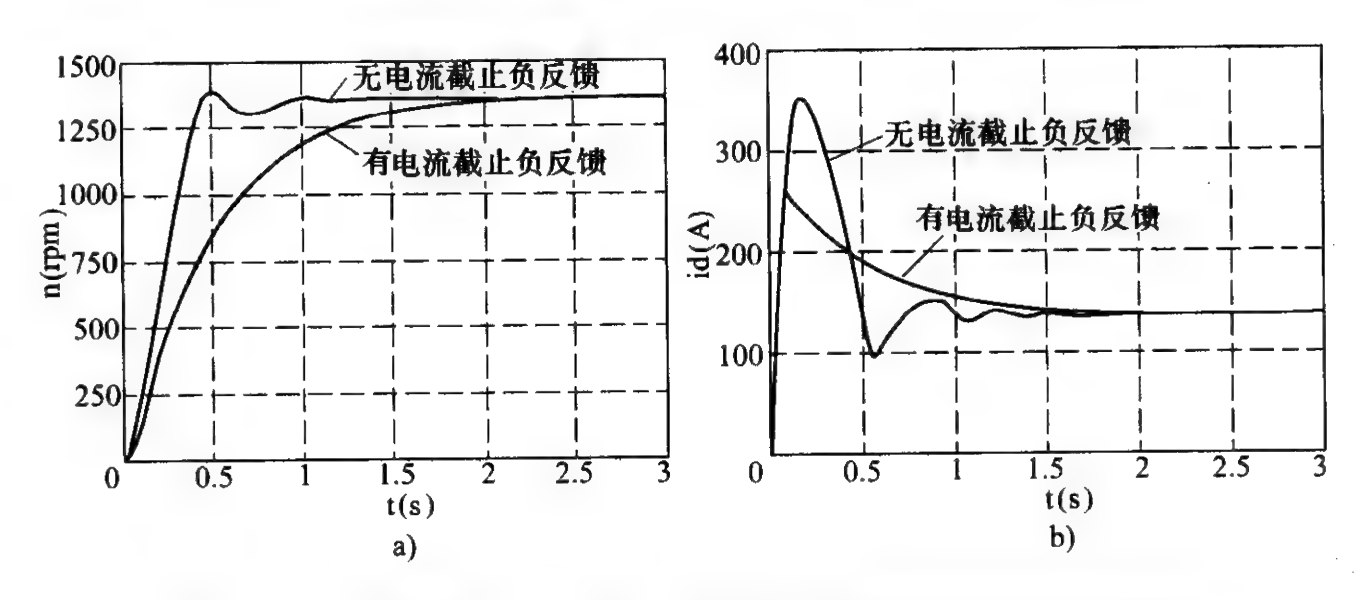


图 6-10　带电流截止负反馈的转速单闭环控制调速系统仿真结果

a) 转速响应　b) 电流响应

6.3　转速电流双闭环控制的直流调速系统仿真

转速电流双闭环控制的直流调速系统是最典型的直流调速系统，其原理结构如图 6-11 所示。双闭环控制直流调速系统的特点是电动机的转速和电流分别

由两个独立的调节器分别控制，且转速调节器的输出就是电流调节器的给定，因此电流环能够随转速的偏差调节电动机电枢的电流。当转速低于给定转速时，转速调节器的积分作用使输出增加，即电流给定上升，并通过电流环调节使电动机电流增加，从而使电动机获得加速转矩，电动机转速上升。当实际转速高于给定转速时，转速调节器的输出减小，即电流给定减小，并通过电流环调节使电动机电流下降，电动机将因为电磁转矩减小而减速。在当转速调节器饱和输出达到限幅值时，电流环即以最大电流限制 I_{dm} 实现电动机的加速，使电动机的起动时间最短，在可逆调速系统中实现电动机的快速制动。在不可逆调速系统中，由于晶闸管整流器不能通过反向电流，因此不能产生反向制动转矩而使电动机快速制动。

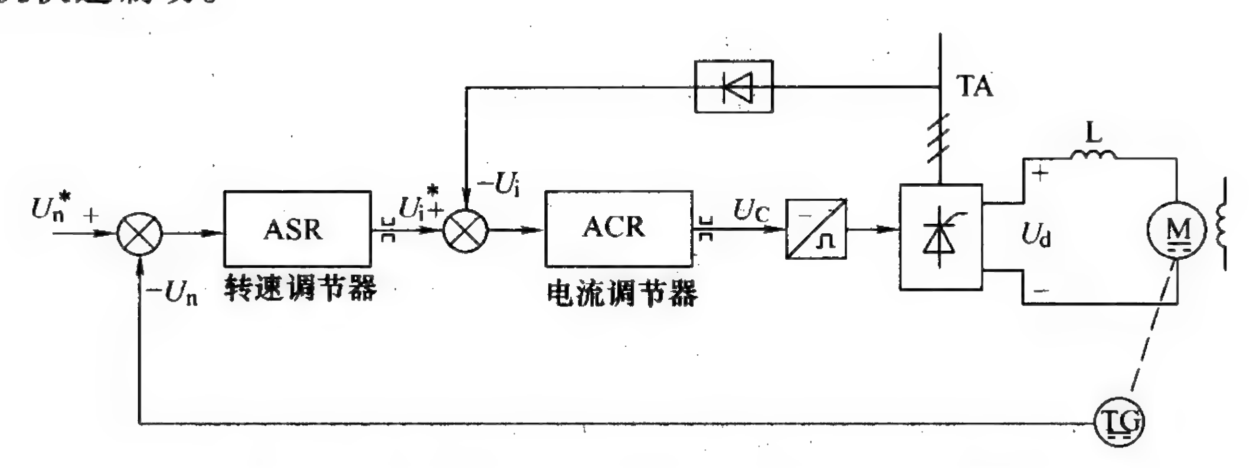


图 6-11　转速电流双闭环控制的直流调速系统原理图

直流双闭环系统的仿真可以依据系统的动态结构图进行，也可以用 Power System 的模块来组建。两种仿真不同在于主电路，前者晶闸管和电动机是用传递函数来表示，后者晶闸管和电动机是使用 Power System 的模块，而控制部分是相同的。下面分别对两种方法进行介绍。

6.3.1　按直流双闭环系统动态结构图仿真

依据系统的动态结构图的仿真模型如图 6-12 所示，仿真模型与系统动态结构图的各个环节基本上是对应的，需要指出的是，双闭环系统的转速和电流两个调节器都是有饱和特性和带输出限幅的 PI 调节器，为了充分反映在饱和和限幅非线性影响下调速系统的工作情况，需要构建考虑饱和和输出限幅的 PI 调节器，过程如下：

线性 PI 调节器的传递函数为

$$W_{PI}(S) = K_p + \frac{1}{K_i S} = K_p \frac{1+\tau S}{\tau S}$$

式中，K_p 为比例系数；K_i 为积分系数；$\tau = K_p K_i$。

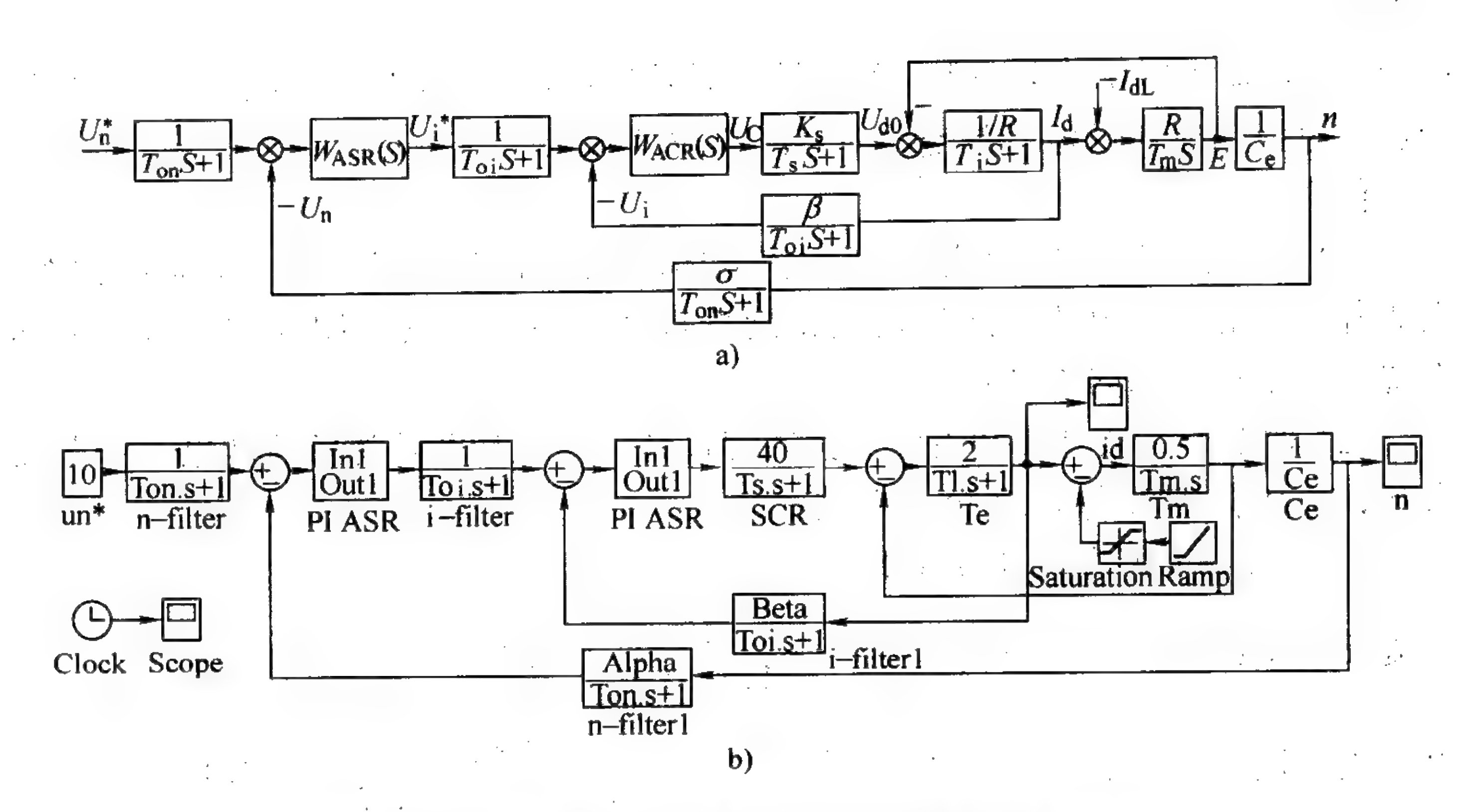


图 6-12 直流双闭环调速系统动态结构图和仿真模型

a) 结构图 b) 仿真模型

上述 PI 调节器的传递函数可以直接调用 SIMULINK 中的传递函数或零极点模块。而考虑饱和和输出限幅的 PI 调节器模型如图 6-13a 所示。模型中比例和积分调节分为两个通道，其中积分调节器 integrate 的限幅表示调节器的饱和限幅值，而调节器的输出限幅值由饱和模块 Saturation 设定。当该调节器用作转速调节器 ASR 时，在起动中由于开始转速偏差大，调节器输出很快达到输出限幅值，在转速超调后首先积分器退饱和，然后转速调节器输出才从限幅值开始下降。为了使系统模型更简洁，利用了 SIMULINK 的打包功能（Great Subsystem）将调节器模型缩小为一个分支模块，如图 6-13b 所示。

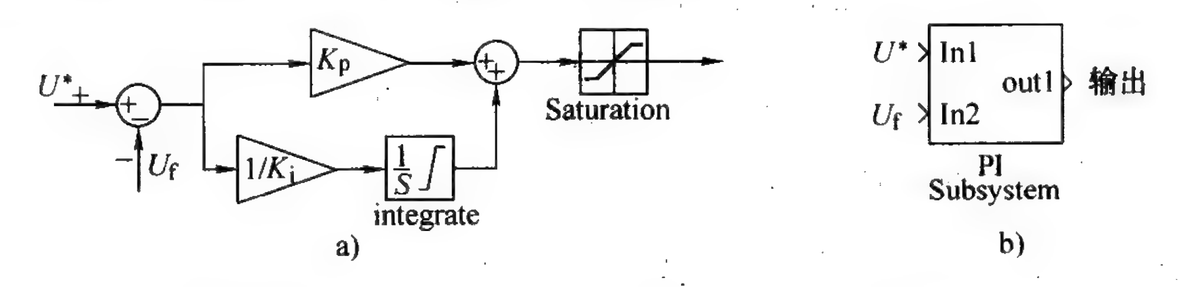


图 6-13 带饱和和输出限幅的 PI 调节器及分支模块

a) 调节器模型 b) 分支模块

【例 6-3】 以例 6-1 的晶闸管-直流电动机系统为基础，设计一转速电流双闭环控制的调速系统，设计指标为电流超调量 $\sigma_i\% \leqslant 5\%$，空载起动到额定转速时的转速超调量 $\sigma_n\% \leqslant 10\%$。过载倍数 $\lambda = 1.5$，取电流反馈滤波时间常数 $T_{oi} = 0.002\text{s}$，转速反馈滤波时间常数 $T_{on} = 0.01\text{s}$。取转速调节器和电流调节器的饱和

值为 12V，输出限幅值为 10V，额定转速时转速给定 $U_n^* = 10V$。仿真观察系统的转速、电流响应和设定参数变化对系统响应的影响。

仿真步骤如下：

（1）构建仿真模型。根据转速电流双闭环控制的直流调速系统动态结构图，提取各元件的仿真模块，连接模块得到按传递函数仿真的双闭环控制直流调速系统仿真模型（见图 6-12）。

（2）调节器参数计算和设定。按工程设计方法设计和选择转速和电流调节器参数，ASR 和 ACR 都采用 PI 调节器。

1）电流调节器参数计算如下：

电流反馈系数为 $$\beta = \frac{U_{im}^*}{\lambda I_{nom}} = \frac{10}{1.5 \times 136} = 0.05$$

电动机转矩时间常数为 $$T_m = \frac{GD^2 R_\Sigma}{375 C_e C_m} = \frac{3.53 \times 2.85}{375 \times 9.55 \times 0.132^2} = 0.161s$$

电动机电磁时间常数为 $$T_l = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{(200 + 16) \times 10^{-3}}{2.85} s = 0.076s$$

三相晶闸管整流电路平均失控时间为 $T_s = 0.0017s$

电流环的小时间常数为 $T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = 0.0017 + 0.002 = 0.0037s$

根据电流超调量 $\sigma_i\% \leqslant 5\%$ 的要求，电流环按典型Ⅰ型系统设计，电流调节器选用 PI 调节器，其传递函数为

$$W_{ACR}(S) = K_{Pi} + \frac{1}{K_{Ii} S} = K_i \frac{1 + \tau_i S}{\tau_i S}$$

其中 $$\tau_i = T_l = 0.076s$$

$$K_i = \frac{\tau_i R_\Sigma}{2 T_{\Sigma i} \beta K_s} = \frac{0.076 \times 2.85}{2 \times 0.0037 \times 0.272 \times 37.84} = 2.84$$

$$K_{Ii} = \frac{\tau_i}{K_i} = \frac{0.076}{2.84} = 0.0268$$

2）转速调节器参数计算如下：

转速反馈系数为 $$\alpha = \frac{U_{nom}^*}{n_{nom}} = \frac{10}{1500} V \cdot min/r = 0.00667 V \cdot min/r$$

为加快转速的调节速度，转速环按典型Ⅱ型系统设计，并选中频段宽度 $h = 5$，转速调节器的传递函数为

$$W_{ASR}(S) = K_{Pn} + \frac{1}{K_{In} S} = K_n \frac{1 + \tau_n S}{\tau_n S}$$

其中 $$\tau_n = hT_{\Sigma n} = h(2T_{\Sigma i} + T_{on}) = 5 \times (2 \times 0.0037 + 0.01) s = 0.087s$$

$$K_n = \frac{(h+1) \beta C_e T_m}{2 h \alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{6 \times 0.272 \times 0.132 \times 0.161}{2 \times 5 \times 0.00667 \times 2.85 \times 0.0174} = 10.49$$

$$K_{In} = \frac{\tau_n}{K_n} = \frac{0.087}{10.48} = 0.0083$$

(3) 设定模型仿真参数。仿真算法采用 ode15，仿真时间 1.5s。在 0.8s 时突加 1/2 额定负载。

(4) 启动仿真及结果。从仿真结果（见图 6-14）可以看到，电动机的起动经历了电流上升、恒流升速和转速超调后的调节三个阶段。与该电动机的开环系统相比，电动机起动电流大幅度下降，电流环发挥了调节作用使最大电流限制在设定的范围以内。在 0.8s 时突加 1/2 额定负载后，电动机电流上升转速下降，经过 0.2s 左右时间的调节，转速恢复到给定值。修改调节器参数，可以观察在不同参数条件下，双闭环系统电流和转速的响应，修改转速给定，也可以观察电动机在不同转速时的工作情况。

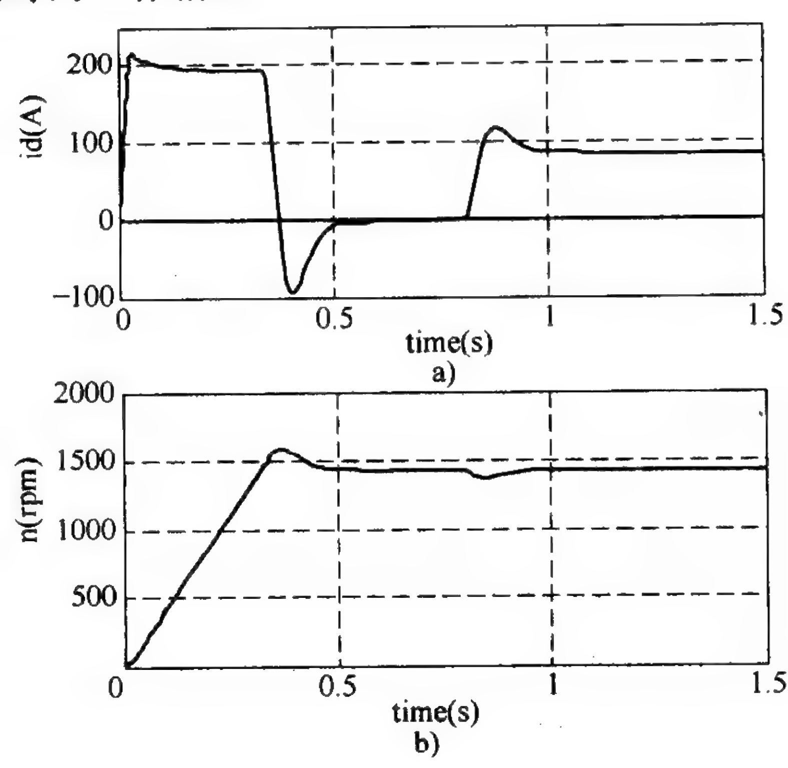


图 6-14　按动态结构图仿真的电流和转速响应曲线

a）电流响应　b）转速响应

6.3.2　使用 Power System 模块的直流双闭环系统仿真

采用 Power System 模块组成的转速电流双闭环控制直流调速系统的仿真模型如图 6-15 所示。模型由晶闸管-直流电动机组成的主回路和转速电流调节器组成的控制回路两部分组成。其中的主电路部分，交流电源、晶闸管整流器、触发器、移相控制环节和电动机等环节使用 Power System 模型库的模块，参见本章 6.1 节。控制回路的主体是转速和电流两个调节器，以及反馈滤波环节，这部分与前述按动态结构图的双闭环系统仿真相同，将这两部分拼接起来，即组成晶闸管-电动机转速电流双闭环控制直流调速系统的仿真模型。

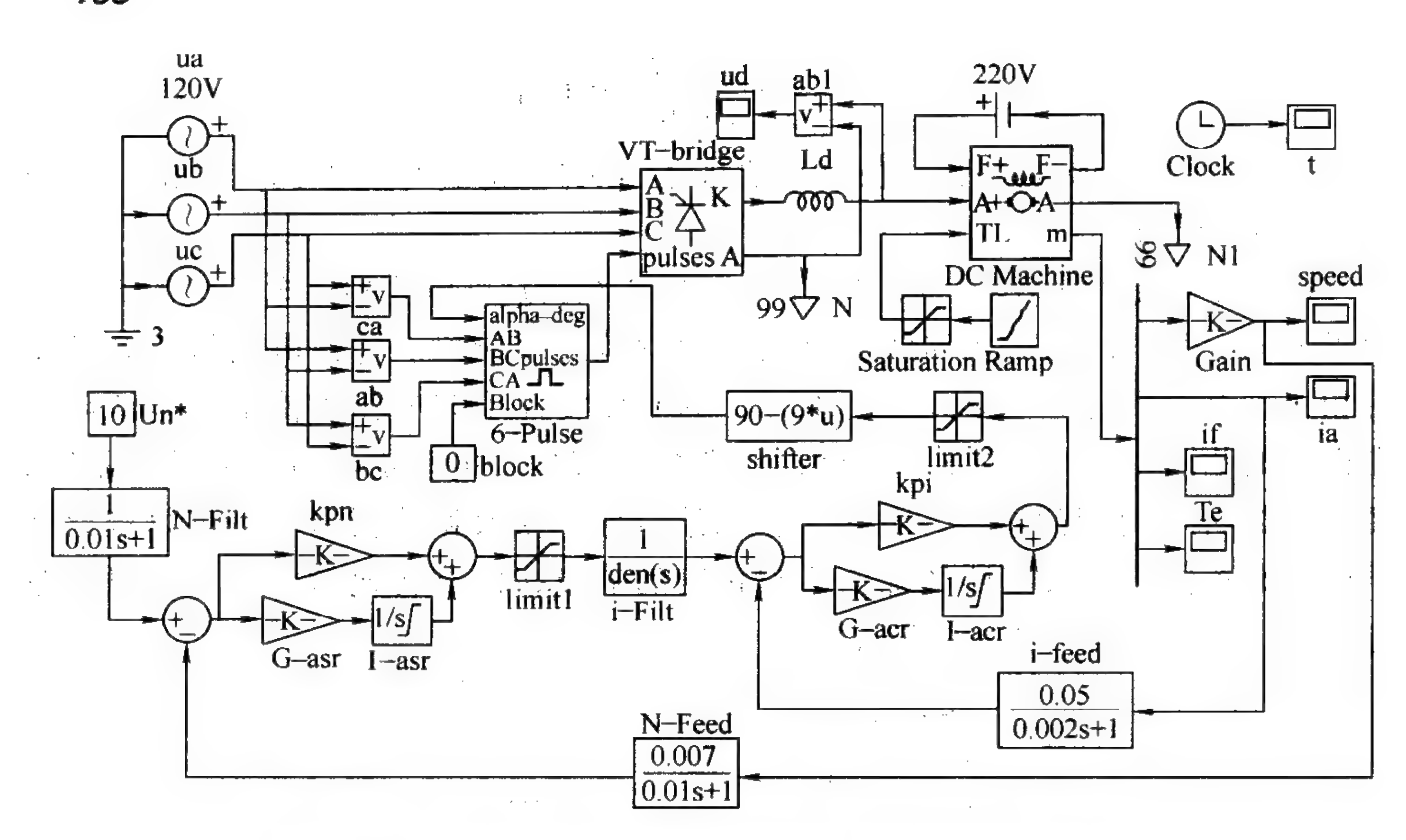


图 6-15 转速电流双闭环控制直流调速系统的仿真模型

模型中转速反馈和电流反馈均取自电动机测量单元的转速和电流输出端，减少了测速和电流检测环节，这不会影响仿真的真实性。电流调节器 ACR 的输出端接移相特性模块 shifter 的输入端，而电流调节器 ACR 的输出限幅就决定了控制角的 α_{min} 和 α_{max} 限制。

图 6-15 与图 6-12b 所示仿真模型的不同点在于，以晶闸管整流器和电动机模型取代了动态结构图中的晶闸管整流器和电动机传递函数，由于动态结构图中的晶闸管整流器和电动机传递函数是线性的，其电流可以反向，而实际的晶闸管整流器不能通过反向电流，因此仿真的结果略有不同，采用晶闸管整流器和电动机模型的仿真可以更好地反映系统的工作情况。

图 6-15 所示模型的仿真结果如图 6-16 所示。其中图 6-16a 所示为电动机电枢两端电压，图 6-16b 所示为电动机转速响应曲线，图 6-16c 所示为电流响应曲线。从转速和电流波形可以看到，在起动阶段电动机以恒流起动，在 0.4s 时起动过程结束，电枢电流下降到零，转速上升到最高且大于 1450r/min，尽管转速已经超调，电流给定变“-”，但是本系统为不可逆调速系统晶闸管整流装置不能产生反向电流，这时电枢电流为零，电动机的电磁转矩也为零，没有反向制动转矩，又因为是在理想空载起动状态，所以电动机保持在最高转速状态。0.5s 后加上负载，电动机转速下降，ASR 开始退饱和，电流环发挥调节作用，使电动机稳定在给定转速上。这结果与按双闭环调速系统动态结构图分析的结构有所不同，不同在于，在动态结构图中由于晶闸管整流器的传递函数是线性的，

输出电压可以变负，电动机电流出现负值（见图6-14a），因此从调节过程来看按动态结构图的仿真调节速度较快。以上是电动机空载起动的情况，如果电动机带负载起动，则两者基本相同。

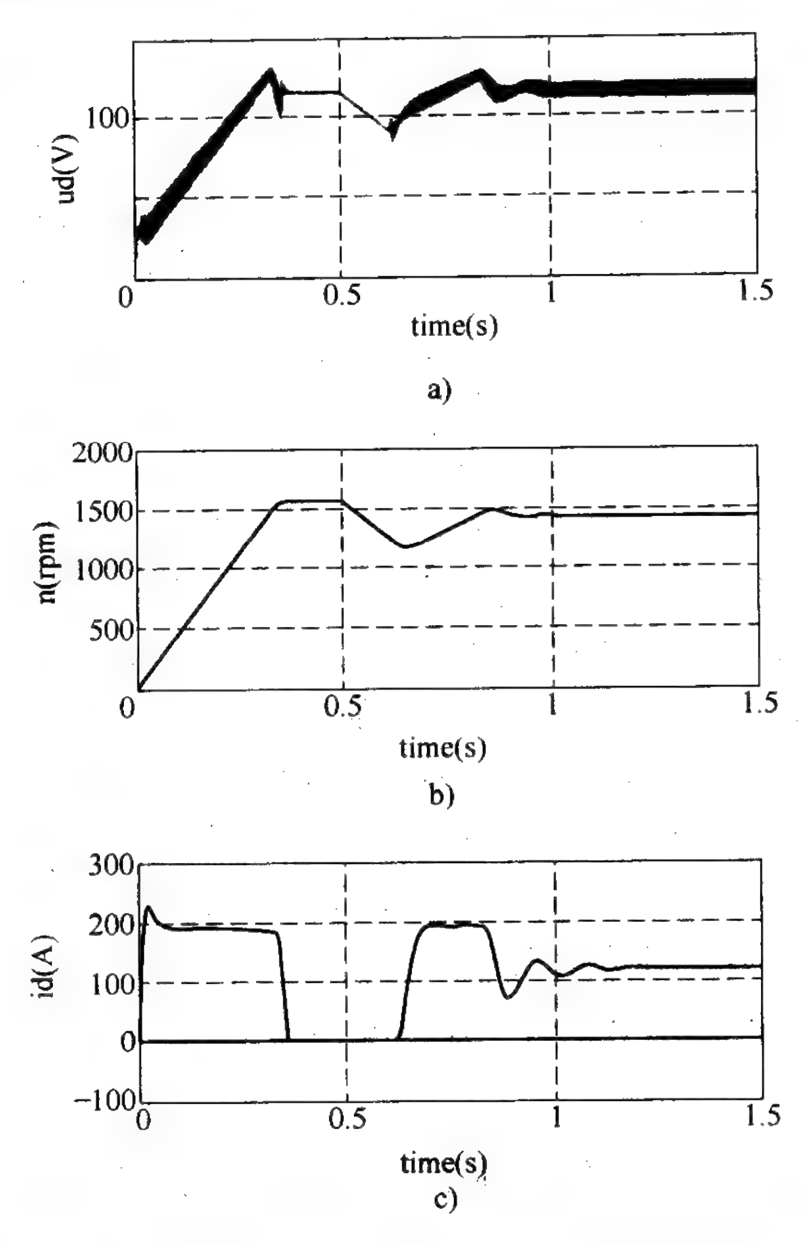


图6-16 晶闸管-电动机模型双闭环系统仿真结果

a）电枢两端电压 b）转速响应 c）电流响应

6.4 直流可逆调速系统仿真

直流电动机的可逆运行需要电动机产生正向和反向转矩，由电动机转矩公式 $T_e = C_m \Phi I_d$，改变转矩方向有两种方法，一是改变电动机励磁 Φ 的方向，二是改变电枢电流 I_d 的方向，本节主要讨论电枢可逆的方案。

在晶闸管-直流电动机系统中，因为晶闸管整流器的单向导电性能，不能产生反向电流，因此在晶闸管-直流电动机可逆系统中需要将两套整流器反并联给电动机供电（见图6-17），图中一套整流器VF向电动机提供正向电流，称正组整流器；一套整流器VR向电动机提供反向电流，称反组整流器。由于两组整流

器反并联，两组整流器的工作状态就有几种情况。

(1) 两组整流器都同时工作于整流状态。在这种状态下，两组整流器的输出电压将顺向联接，会产生很大的环流（指不经过电动机，而在两组整流器中流通的电流），这是不允许的工作状态。

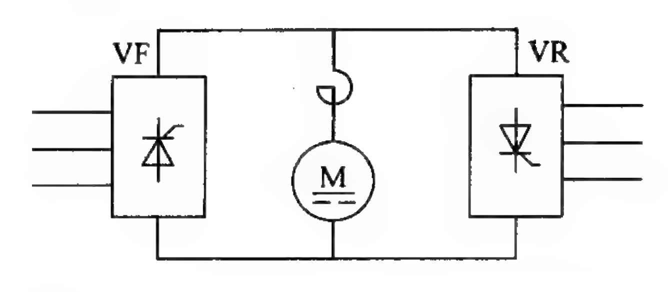


图 6-17　可逆系统两组整流器的联接

(2) 一组整流器工作在整流状态，其控制角为 α ($0° \leqslant \alpha \leqslant 90°$)；另一组整流器工作在逆变状态，其控制角为 β ($0° \leqslant \beta \leqslant 90°$)，且 $\beta = 180° - \alpha$。如果 $\alpha = \beta$，则两组整流器输出平均电压相等，没有直流环流，但由于两组整流器输出的瞬时电压仍可能不相等，还会产生瞬时脉动环流。如果 $\alpha < \beta$，则整流组输出平均电压大于逆变组输出平均电压，则两组整流器间既有直流环流也会有瞬时脉动环流。如果 $\alpha > \beta$，则整流组输出平均电压小于逆变组输出平均电压，不会产生直流环流，但仍会产生脉动环流。这几种情况统称配合控制的有环流可逆系统。

(3) 在一组整流器工作时（无论工作在整流还是逆变状态），另一组整流器不给触发脉冲，则整流器不会导通，即处于封锁状态，这时两组整流器之间不可能有环流通路，既不会产生直流环流也不会产生脉动环流，采用这种控制模式的可逆系统称无环流可逆系统。无环流可逆系统一般有逻辑无环流可逆调速系统和错位无环流可逆调速系统两种。

本节讨论 $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统和逻辑无环流可逆调速系统的仿真问题。

6.4.1　$\alpha = \beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统仿真

6.4.1.1　$\alpha = \beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统工作原理

$\alpha = \beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统的电气原理图如图 6-18 所示。图中，主电路由两组三相桥式晶闸管全控型整流器反并联组成，并共用同一路三相电源。由于采用 $\alpha = \beta$ 配合控制方式，在两组整流器之间没有直流环流，但还存在脉动环流，为了限制脉动环流的大小，在主电路中串入了四个均衡电抗器 $L_{C1} \sim L_{C4}$，用于限制脉动环流。平波电抗器 L_d 用于减小电动机电枢电流的脉动，减小电枢电流的断续区，改善电动机的机械特性。系统的控制部分采用了转速和电流的双闭环控制。由于可逆调速电流的反馈信号不仅要反映电枢电流的大小还需要反映电枢电流的方向，因此电流反馈一般用直流电流互感器或霍尔电流检测器，在电枢端取电流信号。为了确保两组整流器的工作状态相反，电流调节器的输出分两路，一路经正组桥触发器 GTF 控制正组桥整流器，另一路经倒相器 AR、反组桥触发器 GTR 控制反组桥整流器。

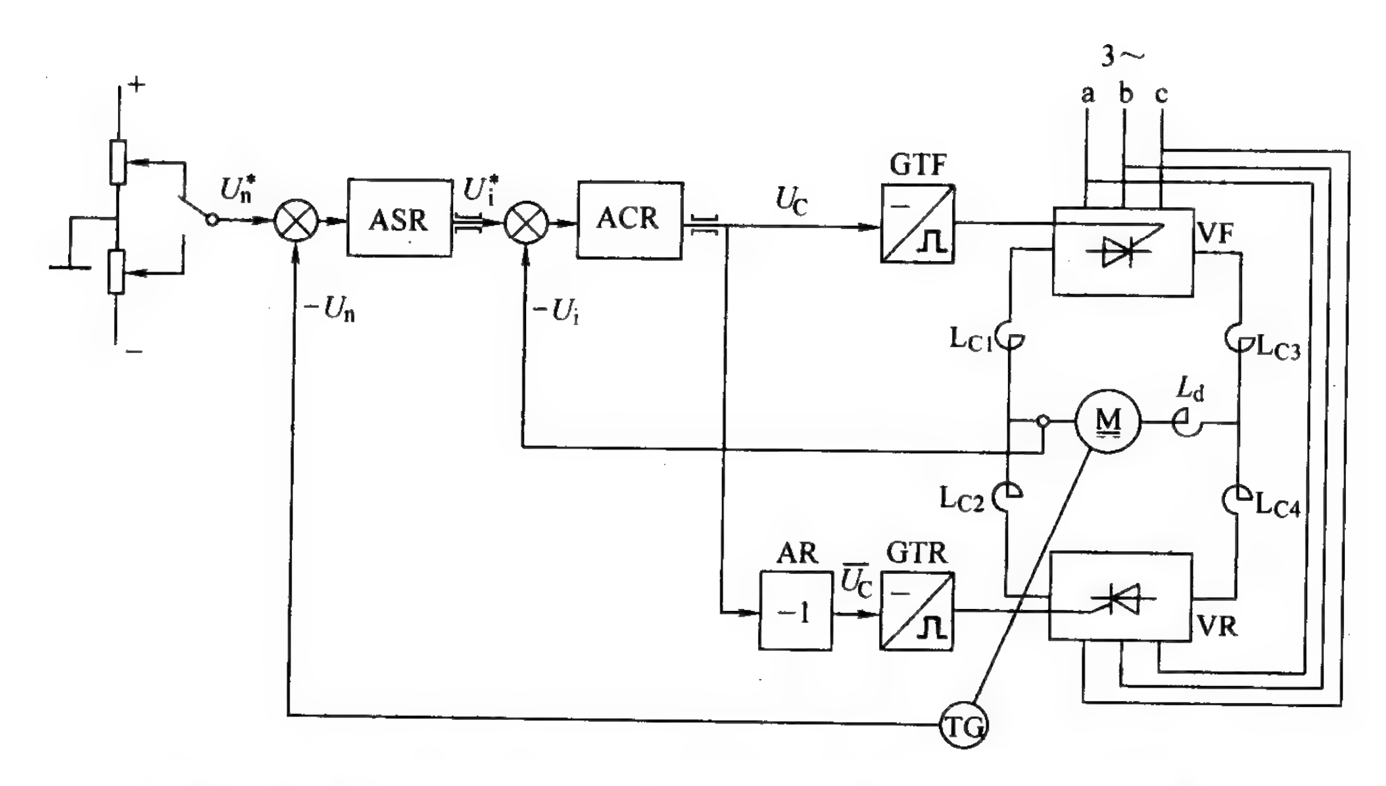


图 6-18　$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统的电气原理图

系统的起动和运行过程与不可逆双闭环调速系统相同，在突加给定信号 U_n^* 为正时，正组桥工作于整流状态，反组桥工作于逆变状态，由正组桥向电动机提供正向电流，电动机经历电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段后，进入正转稳定运行阶段，反组桥仅有少量脉动环流通过。在突加给定信号 U_n^* 为负时，正组桥工作于逆变状态，反组桥工作于整流状态，由反组桥向电动机提供反向电流，电动机同样经历电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段后，进入反转稳定运行阶段，而正组桥仅有少量脉动环流。

可逆系统的特点在于反转制动过程，电动机反转需要改变转矩的方向，由 $T_e = C_m \Phi I_d$，改变转矩方向即需要改变电枢电流的方向，由于电枢回路存在着电感，电枢电流的流向改变则要经历电流的下降，和反向电流上升和建立的过程。由于电感是储能元件，电感储能与电流有关 $Q_L = LI_d^2/2$，因此电流下降就意味着电感储能的释放，电流上升就意味着电感的储能增加的过程。因此，电动机的反转制动过程可以分为本桥逆变、反接制动（反向建流）和回馈制动三个主要阶段，现以正转到反转的过程给予说明。

（1）本桥逆变阶段。在这阶段中正转回路的电感释放能量，正向电流下降直到零，电动机转速基本不变。当转速给定由正变负时，转速调节器的输出即电流调节器的输入 U_i^* 改变极性，从而电流调节器的输出 U_C 改变符号，使正组桥从整流改变为逆变状态，反组桥从逆变改变为整流状态，正转回路的电感能量释放，由电感反电动势 $e_L = L_\Sigma \mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 维持电枢正转回路电流的流通，电动机的正向电流下降，电感储能经正组桥（逆变状态）流向交流电源，而反组整流器由

于不能通过反向电流，除少量脉动环流外，没有负载电流通过，处于待整流状态。

(2) 反接制动阶段。当电动机的正向电流下降到零后，电感反电动势作用消失，处于整流状态的反组整流器开始输出电流，电枢电流开始反向，由于整流器输出电压与电动机反电动势的方向相同，电动机处于反接制动状态，电流上升很快。在这阶段中，电动机的转速开始下降，反向电流开始上升，正组整流器同样由于不能通过反向电流，除少量脉动环流外，没有负载电流通过，处于待逆变状态，电感的储能开始增加。

(3) 回馈制动阶段。在反接制动阶段中由于电流上升很快，当电流反馈大于电流给定值时，电流调节器的输出 U_C 又改变极性，使正组整流器处于整流状态，反组整流器处于逆变状态，这时由于电枢反电动势与整流器输出电压反向相反，且电枢反电动势大于整流器输出电压，这时回路的电流由电枢电动势产生，且经反组整流器（逆变状态）流向交流电源，电动机进入发电回馈制动阶段。这阶段的特点是电动机转速不断下降，电动机的惯性储能经反组整流器回输电网，产生良好的节能效果。随着转速的下降，电枢电动势也不断下降，但由于转速调节器的输出在电动机转速没有反向超调时，始终保持着最大限幅状态，这时电流调节器发挥作用，维持电动机以最大电流回馈制动，即电流调节器的输出随转速的下降而减小，相应晶闸管的控制角不断加大，整流器输出电压随之减小，从而保持最大的制动电流，取得最快的制动效果。

$\alpha=\beta$ 控制的有环流可逆调速方式，在实际应用中由于难以准确保持 $\alpha=\beta$ 的状态，一旦出现 $\alpha\neq\beta$ 时，就有可能产生直流环流，使整流器过载或损坏，故实际上并不采用，但研究 $\alpha=\beta$ 控制的有环流可逆系统，对理解直流电动机的可逆过程有很大帮助。下面通过 $\alpha=\beta$ 配合控制可逆系统的仿真，研究直流电动机的可逆过程。

6.4.1.2 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统的仿真模型

$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统的仿真模型如图 6-19 所示。

模型中交流电源（ua、ub、uc）、两组反并联的整流器（VF、VR）和触发器（6-Pulse、6-Pulse1）、环流电抗器 Ld1 ~ Ld4、平波电抗器 Ld 和电动机组成可逆系统的主电路。控制回路由转速给定、转速调节器 ASR、电流调节器 ACR、倒相器 Gain1、移相控制模块 shifter、shifter1 和转速、电流反馈等模块组成。其中给定环节可以通过切换开关（Manual Switch）选择电动机转向，在需要改变转向时，双击该切换开关即可完成正转到反转或反转到正转的给定切换。转速和电流的反馈信号均取自电动机测量单元的输出。转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR 由带输出限幅的 PI 调节器分支电路组成。

模型的主要参数见表 6-1。

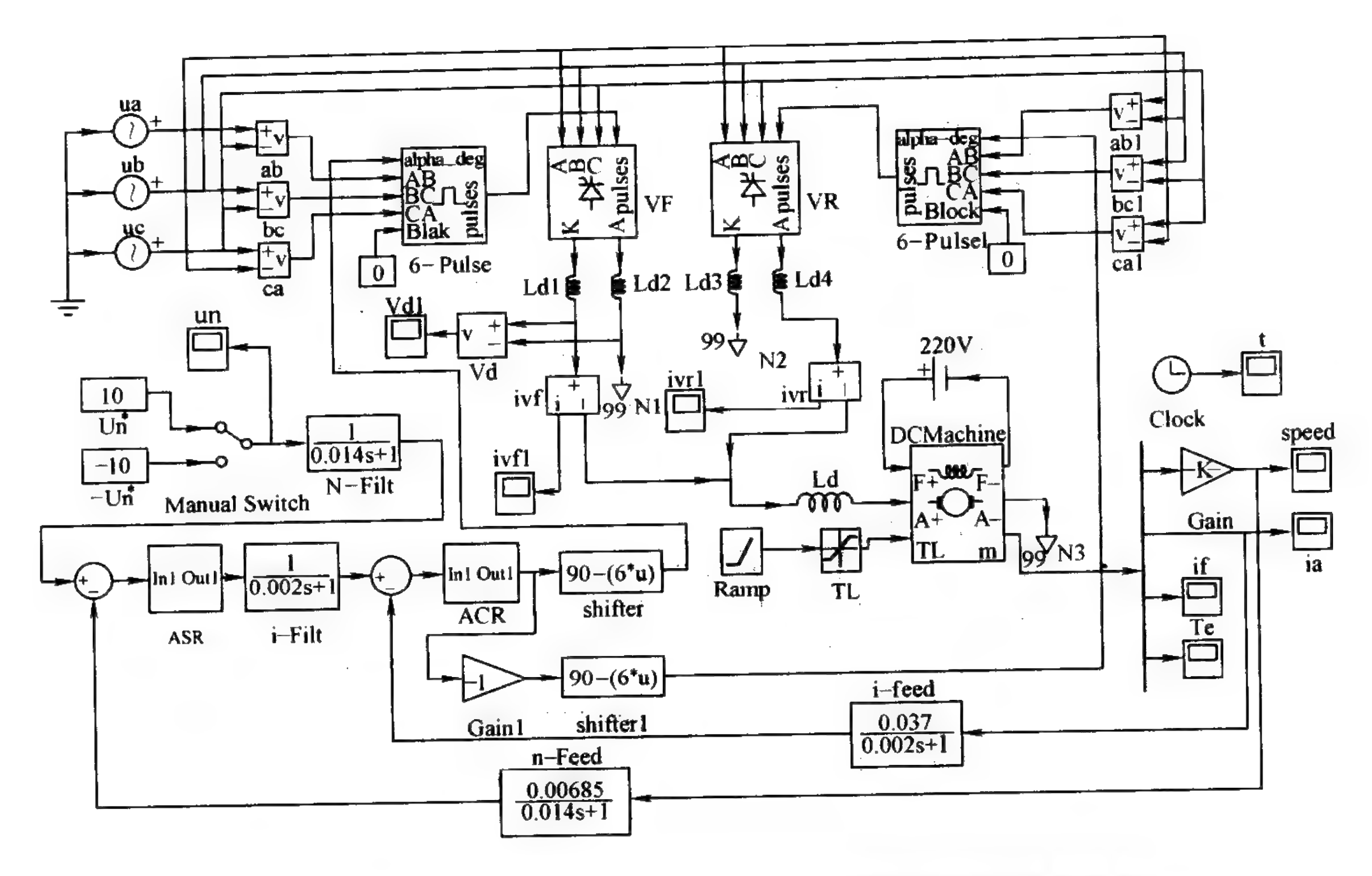


图 6-19　$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统的仿真模型

表 6-1　可逆调速系统仿真模型参数

电源	160V（峰值）50Hz
电动机	$R_a=0.21\Omega$　$L_a=0.000543\text{H}$　$U_f=220\text{V}$ $U_f=220\text{V}$　$R_f=14.7\Omega$　$L_f=0$ $L_{af}=0.084\text{H}$　$J=2.29\text{kg}\cdot\text{m}^2$
转速调节器	$K_p=11.7$　$K_n=134.5$
电流调节器	$K_p=5.013$　$K_i=33.8$
电抗器	图 6-19 中 Ld1 ~ Ld4 的值为 0.002H　Ld 的值为 0.015H

6.4.1.3　$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流直流可逆调速系统仿真波形和分析

图 6-19 所示的可逆系统从正转起动到反转过程的转速和电流变化波形如图 6-20 所示。仿真了 8s 的变化过程，其中 0 ~ 2.3s 为系统的正转起动过程，2.3 ~ 0.4s 为系统的加载过程，0.4 ~ 8s 为系统的反转过程。在起动过程中可以看到，系统经历了电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段，在转速超调后电流迅速下降并且出现负向电流，这与不可逆调速系统的起动过程不同，因为不可逆调速系统不能产生反向电流，而可逆系统反转整流器可以提供反向电流，并加快起动的调节过程。因为是理想空载起动，起动结束时电枢电流为零。在 2.3s 时，电动机加上负载，转速发生波动，并且电流增加，经过 1s 左右时间的调整，系

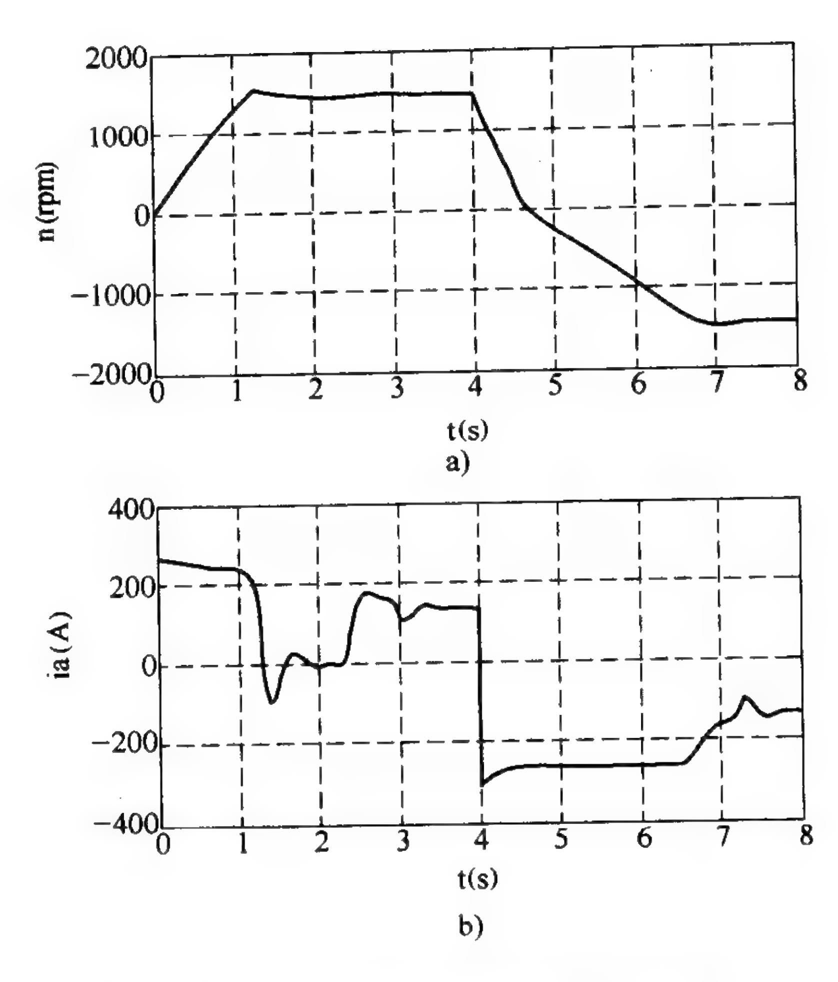


图 6-20　反转过程中的转速和电流波形
a）转速曲线　b）电流曲线

统达到新的平衡状态，转速恢复到 1450r/min，电流上升到 150A。

在起动后 4s 转速给定转速从“+”切换到“-”，系统进入反转的调节状态。电枢电流迅速改变方向，并从正变到负的最大值，电动机转速也由正变负，系统经历了本桥逆变和反接制动两个阶段。这两个阶段的放大波形如图 6-21 所示。从 3.99s 反转过程开始到 4s 时间内，电动机的正向电流下降（见图 6-21a），转速没有太大的变化（见图 6-21b），平波电感的反电动势为负，与电动机电枢反电动势方向相反，且平波电感的反电动势大于电动机电枢电动势（见图 6-21c 和图 6-21d），因此是平波电感储能释放，维持电动机的正向电流。这时，仍是正组桥导通，其控制角为 β，系统进入了本桥逆变阶段。在 4s 之后，电枢电流开始改变方向，并反方向增加，反组桥进入整流，系统开始反接制动阶段，电动机转速下降。在 4.01s 左右，电流开始反向超调，这时在系统电流环的调节下反组整流器变为逆变状态，转速和电动机反电动势进一步减小，电动机的惯性储能释放，并经反组整流器流回电网，这是系统的回馈制动阶段。在 4.7s 转速下降为零时回馈制动阶段结束，系统又开始反向恒流起动过程，直到电动机进入反转的稳定运行阶段，读者可以通过仿真波形，更细致地分析系统各阶段工作的特点。

图 6-22 所示为上述 $\alpha=\beta$ 可逆调速系统的环流分析。其中图 a、b 分别为正

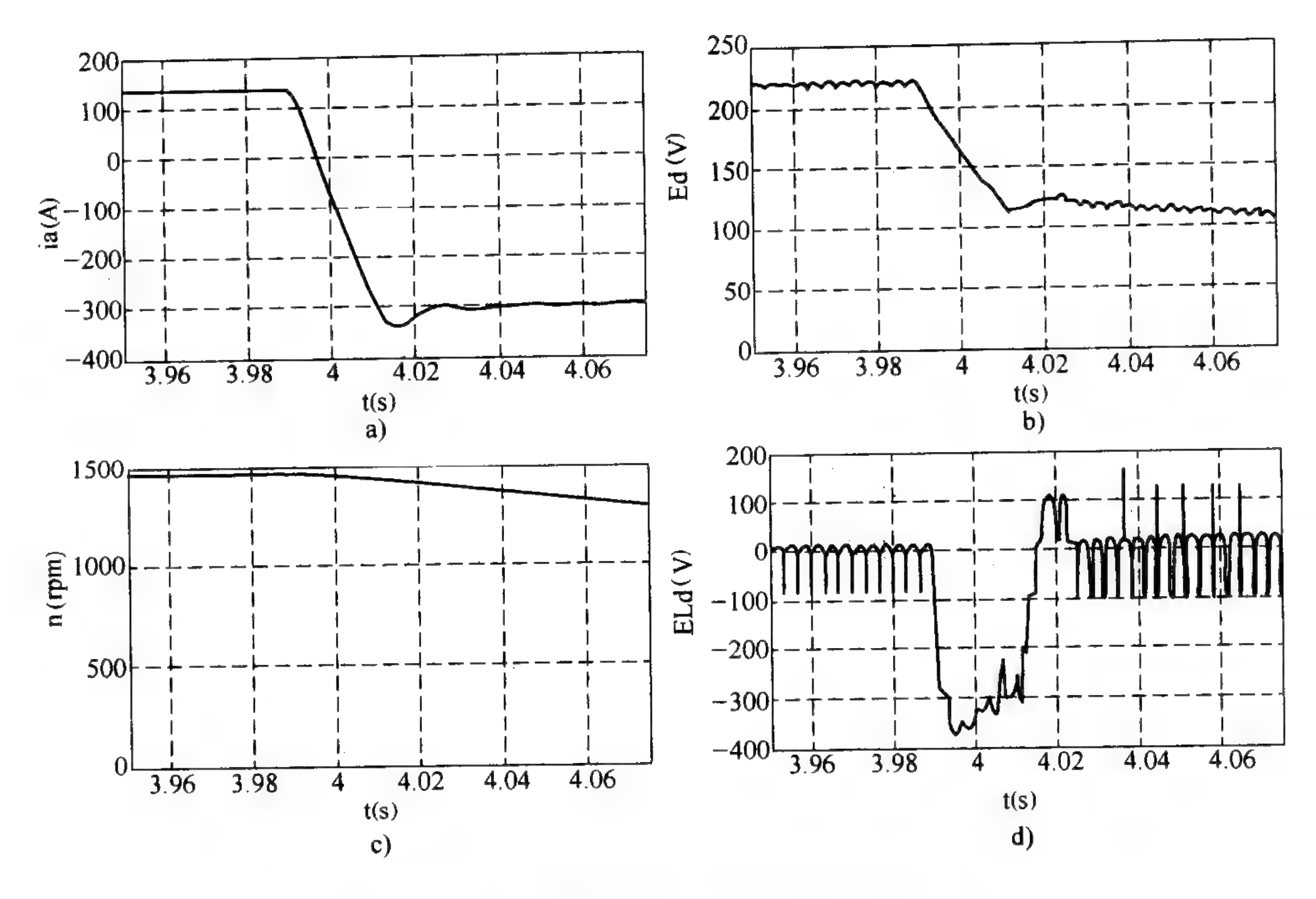


图 6-21　本桥逆变和反接制动阶段分析

a) 电枢电流　b) 电动机转速　c) 电动机反电动势

d) 平波电感反电动势

转时 3.5～3.56s 内正组和反组整流器的输出电压波形，从波形可以看到两组整流器的输出电压平均值相等，但是电压瞬时值并不相等，在正组电压瞬时值大于反组电压瞬时值时，就可以产生不经过电动机的直流环流。图 6-22c 所示为正反组整流器反并联后的电枢支路电压波形，由于限制环流电抗器的均衡作用，该电压 $u_d = u_{df} - u_{dr}/2$。图 6-22d 和图 6-22e 分别为正组和反组整流器的输出电流波形，正组整流器电流中包含了电动机负载电流和环流，反组整流器电流中只有脉动的环流成分，而电动机的电枢电流基本上是平稳的直流（见图 6-22f），且 $i_d = i_{vf} + i_{vr}$。

图 6-23 所示为电动机从正转起动到反转过程中的转矩/转速曲线（机械特性）。从机械特性可以看到正反转过程经历了特性的三个象限，其中，第一象限电动机工作于正转电动状态，并在起动过程中电动机基本保持了最大转矩的升速；在第二象限电动机转矩变为负，转速减小，电动机工作于正转发电制动状态，这时电动机转速迅速下降到零；在第三象限电动机以最大反向转矩反向升速，最后稳定在反转工作点上，因为转速转矩均为负，所以电动机工作在反转电动状态。

图 6-22　两组整流器的环流分析

a）正组整流器输出电压波形　b）反组整流器输出电压波形　c）电枢支路电压波形　d）正组整流器输出电流波形　e）反组整流器输出电流波形　f）电动机负载电流波形

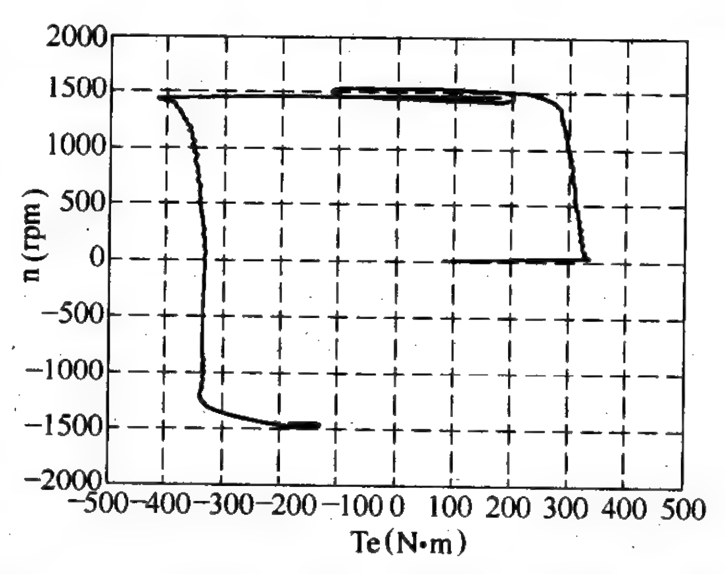


图 6-23　电动机正转到反转过程中的机械特性

6.4.2 逻辑控制无环流直流可逆调速系统仿真

在两组反并联供电的直流电动机可逆调速系统中，如果在一组整流器工作时，封锁状态另一组整流器，即切断这组整流器的触发脉冲，使这组整流器不工作，这样两组整流器之间就没有环流通路，既不会产生直流环流也不会产生脉动环流。这种系统一般由逻辑控制器来判断在正反转或制动过程中那组整流器应该工作（包括整流和逆变两种状态），那组整流器应该封锁，故称为逻辑控制无环流可逆调速系统。逻辑无环流可逆系统的思路简洁，并且由于不存在环流和没有环流带来的损耗，整流器的容量可以减小，也不需要限制环流的电抗器，是目前晶闸管-直流电动机可逆系统常用的控制方案。

6.4.2.1 逻辑控制无环流直流可逆调速原理和仿真模型

逻辑控制无环流直流可逆调速系统的电气原理图如图 6-24 所示。系统主电路也采用两组整流器反并联方案。系统的控制电路由转速调节器，电流调节器，逻辑控制器等组成，且两组整流器分别由两个电流调节器控制，其中反组整流器 VR 的电流调节器 ACR2 输入经过了倒相器，以确保两组整流器的控制角 $\alpha=\beta$。两组整流器的工作或封锁由逻辑控制器控制。

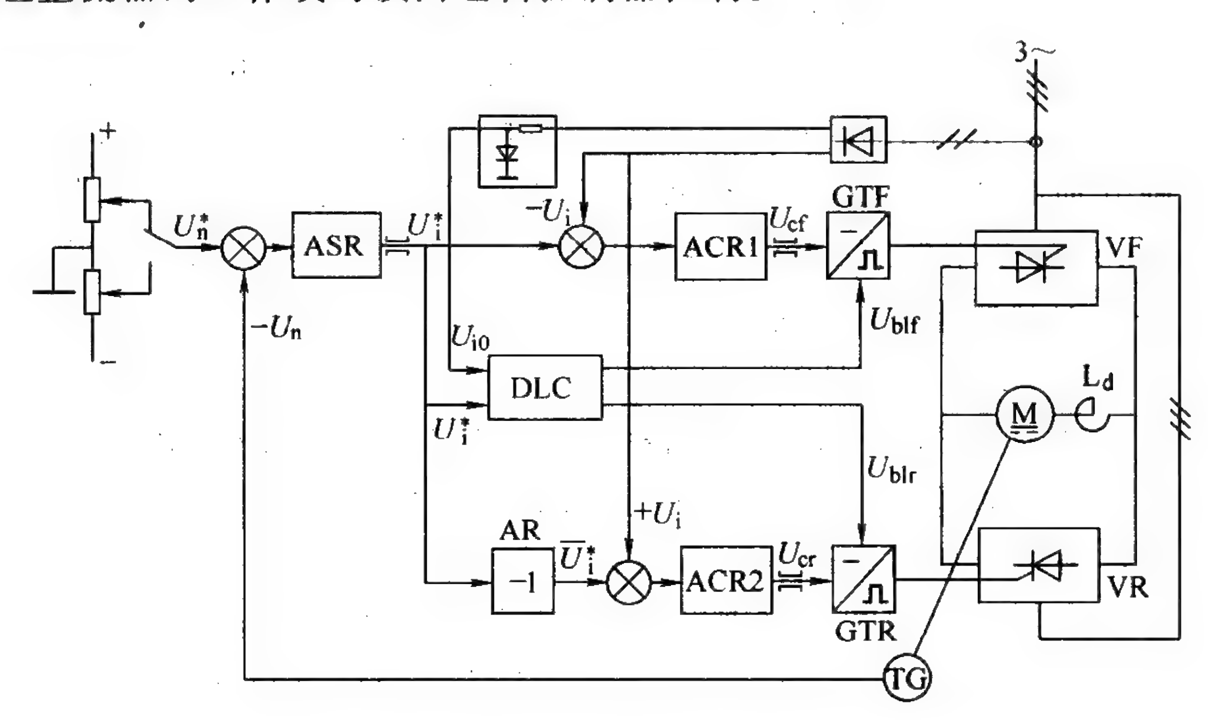


图 6-24 逻辑控制无环流直流可逆调速系统的电气原理图

逻辑控制器 DLC 有两个输入和两个输出，两个输出信号 U_{blf}和 U_{blr}分别通过触发器来控制是否产生还是封锁触发脉冲，输出信号 U_{blf}和 U_{blr}的状态必须始终保持相反，以保证两组整流器不会同时处于工作状态。逻辑控制器的两个输入信号 U_i^* 和 U_i 是逻辑控制器判别改变输出信号状态的重要条件。由于电动机的制动和改变转向都需要改变电动机的转矩方向，即电枢电流的方向，在系统控

制中电流的方向是由转速调节器输出 U_i^* 的极性来决定的，也就是说 U_i^* 的符号（极性）改变是逻辑切换的条件之一。但是 U_i^* 的符号改变还不是逻辑控制器判别改变输出信号状态的唯一条件，因为从 $\alpha=\beta$ 配合控制的分析中已经知道，可逆系统的快速制动或反转过程要经历本桥逆变、反接制动和回馈制动三个阶段。在本桥逆变阶段电动机电流下降到零，然后才经过反接制动阶段建立反向电流，如果在本桥逆变阶段尚未结束时就关断该整流器，就可能产生逆变失败现象，并损坏整流器，所以在转速调节器的输出 U_i^* 改变极性后，还必须等待电动机原方向电流减小到零后，$U_i=0$，才能关断原来工作的整流器，而开通原封锁的另一组整流器，因此电枢电流下降为零 $U_i=0$ 是逻辑切换的条件之二。只有在 U_i^* 改变极性和 $U_i=0$ 两个条件都满足后，逻辑控制器的输出状态才能改变。

逻辑无环流直流系统仿真模型如图 6-25 所示，模型的主电路部分基本上与 $\alpha=\beta$ 配合控制有环流可逆系统相同，因为没有环流，因此不设环流电抗器。控制部分的转速调节器 ASR 和两个电流调节器 ACR1、ACR2 由带输出限幅的 PI 调节器打包形成。逻辑控制器 DLC 的输入端分别联接转速调节器的输出 Ui* 和电流的反馈信号 Ui，因为本模型电流反馈取自电动机的电枢电流，因此电流信号可以有正向、反向和零三种状态，而逻辑控制器仅需要判断电枢电流的有无，因此模型中增加了绝对值计算环节（Abs1）。控制器输出的整流器切换信号 Ublf 和 Ublr，则分别通过触发模块的 Block 端控制该模块是否输出移相触发脉冲，触发模块 Block 端的要求是逻辑控制器输出的信号为“0”时，则该触发器允许输出脉冲，如果控制器输出的信号为“1”，则该触发器没有脉冲输出。

6.4.2.2 逻辑控制器

逻辑控制器模块 DLC 是根据控制器输入来判断输出的逻辑状态，可逆调速系统各种运行状态时逻辑控制器输入与输出各量之间的关系见表 6-2。在表 6-2 中归并重复项后，可以得到逻辑判断的真值表，见表 6-3。

设计的逻辑控制器如图 6-26 所示。逻辑控制器由电平检测、逻辑判断、延时电路和等四个环节组成，图 6-26 的下方是封装后的逻辑控制器图标。

1. 电平检测

电平检测是将输入的模拟信号（Ui*、Ui）转换为数字信号（UT、UI），转换由两个滞环控制模块（Relay）实现，转换的要求如下：

(1) 转矩极性检测。当 U_i^*（图 6-26 中 Ui*）>0 时，U_T（图 6-26 中 UT）$=1$；$U_i^*<0$ 时，$U_T=0$。

(2) 零电流检测。当有电流即 U_i（图 6-26 中 Ui）$\neq 0$ 时，U_I（图 6-26 中 UI）$=0$；当电流为零时（$U_i=0$）时，$U_I=0$。

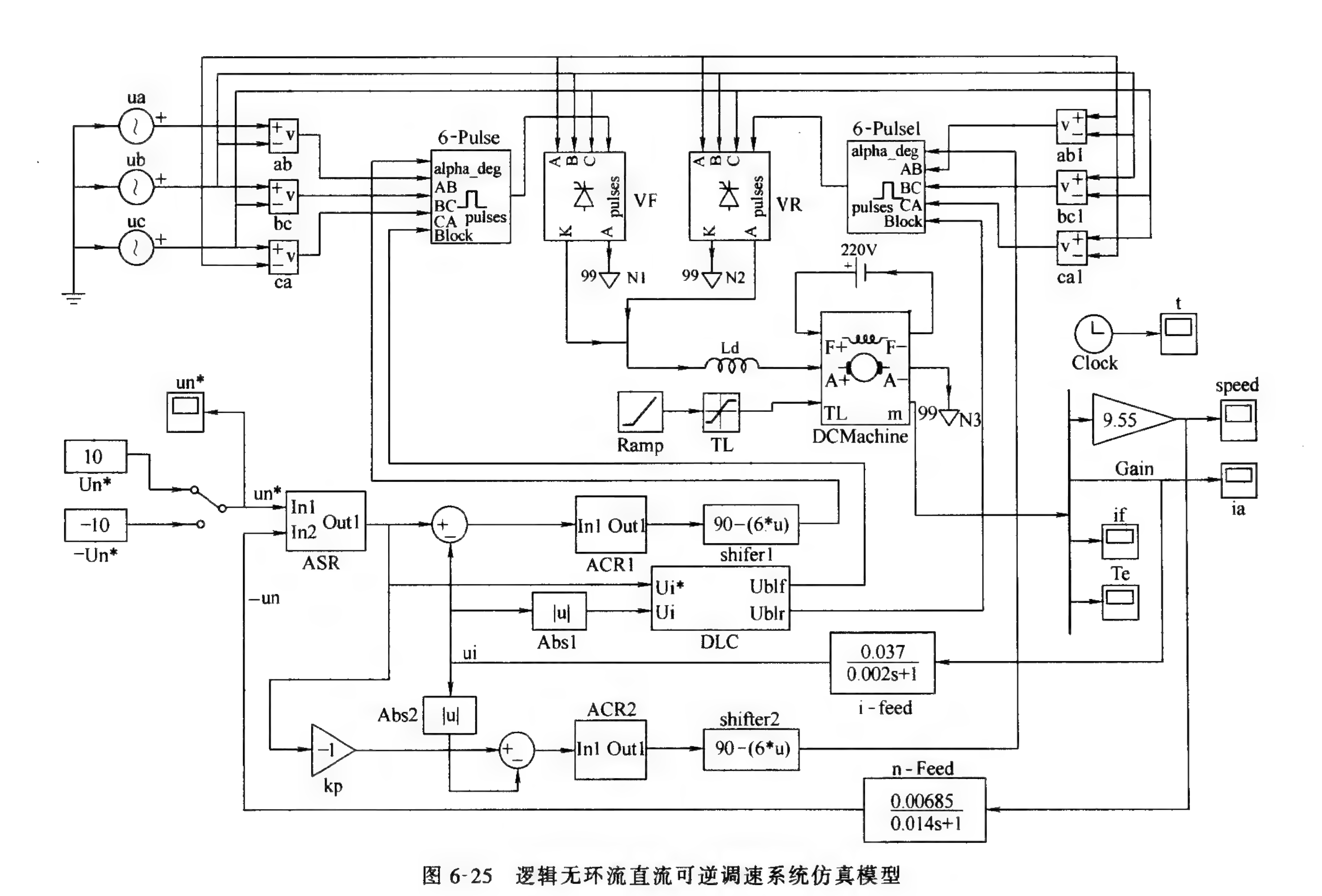


图 6-25　逻辑无环流直流可逆调速系统仿真模型

表 6-2 可逆系统各种运行状态时逻辑控制器输入与输出量之间的关系

运行状态 \ 信号状态		逻辑控制器输入		逻辑控制器输出		说明
		电机转矩 Ui*	电枢电流 Ui	正组整流器 VF Ublf	反组整流器 VR Ublr	
正向起动零电流时		>0	0	0	1	U_i^*（图 6-25 中 Ui*）>0 正向转矩 U_i^* <0 反向转矩 U_i（图 6-25 中 Ui）= >0 正向电流 U_i<0 反向电流 U_i = 0 零电流 U_{blf}（图 6-25 中 Ublf）= 0 正组整流器工作 U_{blf} = 1 正组整流器封锁 U_{blr}（图 6-25 中 Ublr）= 0 反组整流器工作 U_{blr} = 1 反组整流器封锁
正向起动有电流 正向运行有电流		>0	>0	0	1	
正向制动	本桥逆变有电流	<0	>0	0	1	
正向制动	本桥逆变零电流	<0	=0	1	0	
正向制动	它桥逆变有电流	<0	<0	1	0	
反向起动零电流		<0	=0	1	0	
反向起动有电流 反向运行有电流		<0	<0	1	0	
反向制动	本桥逆变有电流	>0	<0	1	0	
反向制动	本桥逆变零电流	>0	=0	0	1	
反向制动	它桥逆变有电流	>0	>0	0	1	

表 6-3 逻辑控制真值表

U_T	U_I	U_F	U_R
1	1	1	0
1	0	1	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	0	0	1
1	0	0	1

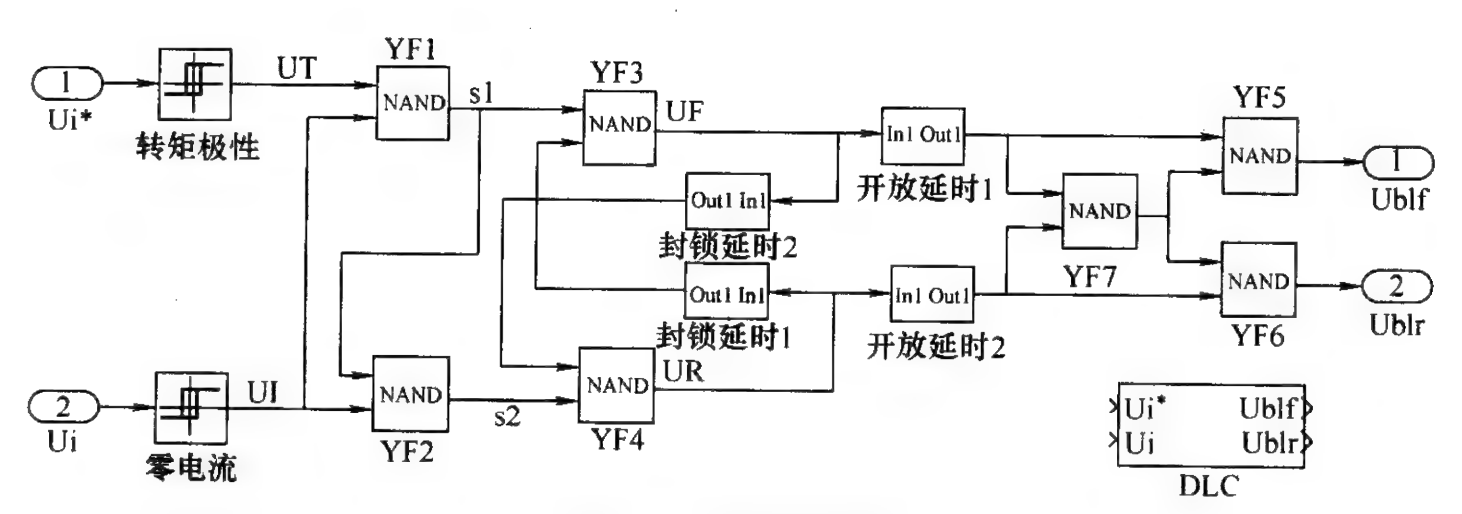
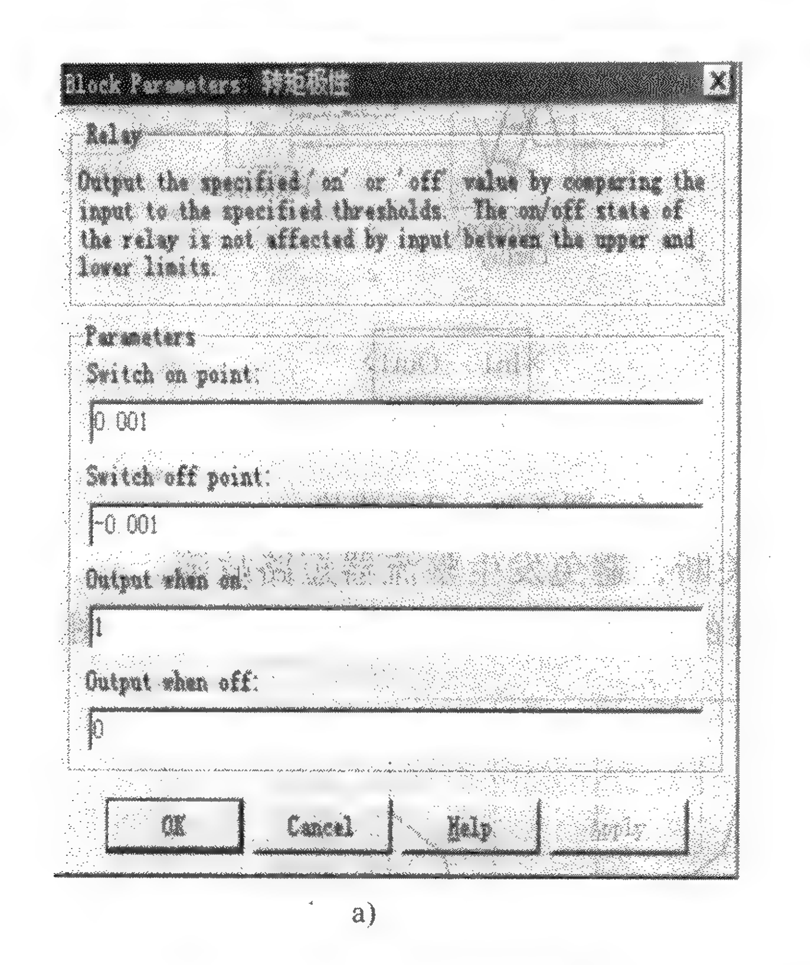
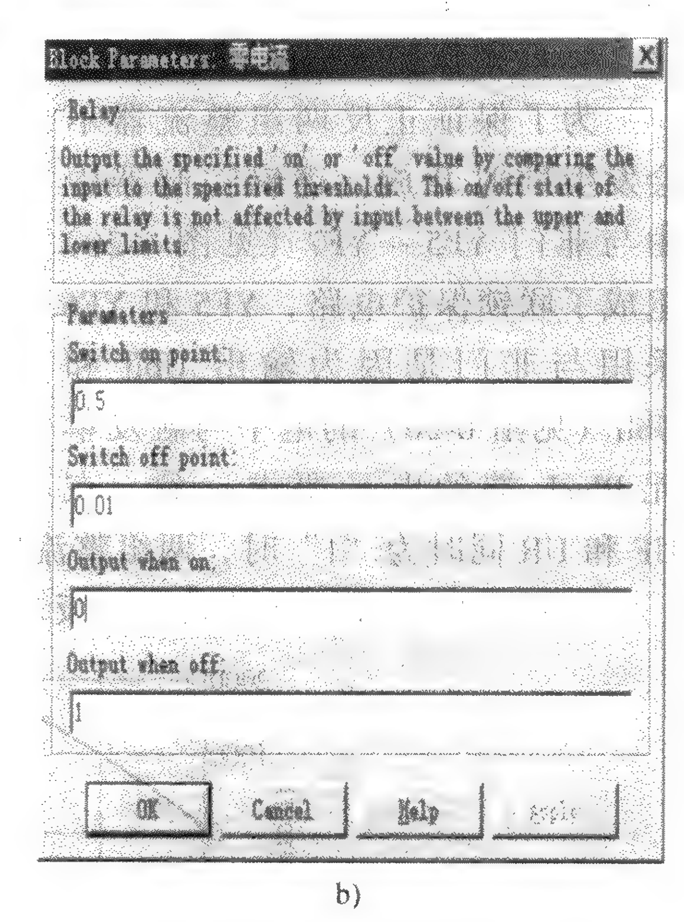


图 6-26 逻辑控制器

在本例中滞环控制模块（Relay）的设置如图 6-27 所示。



a)



b)

图 6-27　电平检测对话框
a）转矩极性检测　b）零电流检测

2. 逻辑判断电路

按表 6-3 可以得到逻辑控制器输入和输出的逻辑关系表达式为（用与非门实现）

$$U_F = \overline{U_R\ (\overline{U_T U_I})}$$

$$U_R = \overline{U_F\ \overline{[\ (\overline{U_T U_I})\ U_I\ ]}}$$

逻辑判断由与非门 YF1 ~ YF4（见图 6-26）组成，其输入为转矩极性和零电流信号 UT、UI；输出为逻辑切换信号 UF、UR（见图 6-26）。

3. 延时电路

逻辑判断电路发出切换指令后还不能立即改变整流器工作状态，因为在检测到电流为零时，电枢电流还不一定真正到零，必须延迟 3ms（关断延时）左右以保证电流真正为零后，才能发出指令使导通的整流器截止；并且为了确保截止的整流器能恢复阻断状态，需开放的整流器也需要延迟一段时间再开放，即开放延时，一般开放延时取 7ms 左右。关断延时和开放延时由逻辑控制器中的延时电路产生。由于延时发生在逻辑判断电路输出 UF 和 UR（见图 6-26）从

"0" 变 "1" 时的上升沿，而信号的下降沿不需要延时，因此设计延时仿真模块如图 6-28 所示。

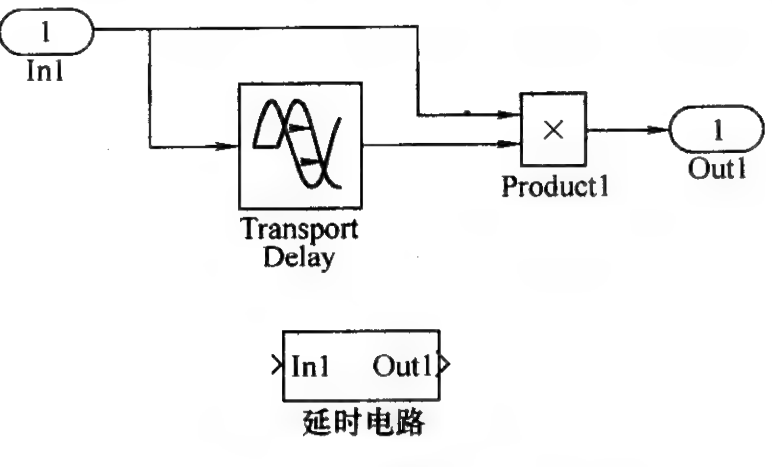


图 6-28　延时模块

4. 联锁保护

为了保证正反两组整流器不会发生同时开放，逻辑控制器中由与非门 YF5 ~ YF7（见图 6-26）组成了联锁保护电路，YF5 和 YF6 采用与非门是因为输出 Ublf 和 Ublr（见图 6-26）的电平与触发单元 Block 端的电平要求一致。在 UF 和 UR 同时为 "1" 时，两组整流器都关断，避免发生整流器短路故障。

逻辑无环流直流可逆系统正反转过程的仿真结果如图 6-29 所示。其中图 a

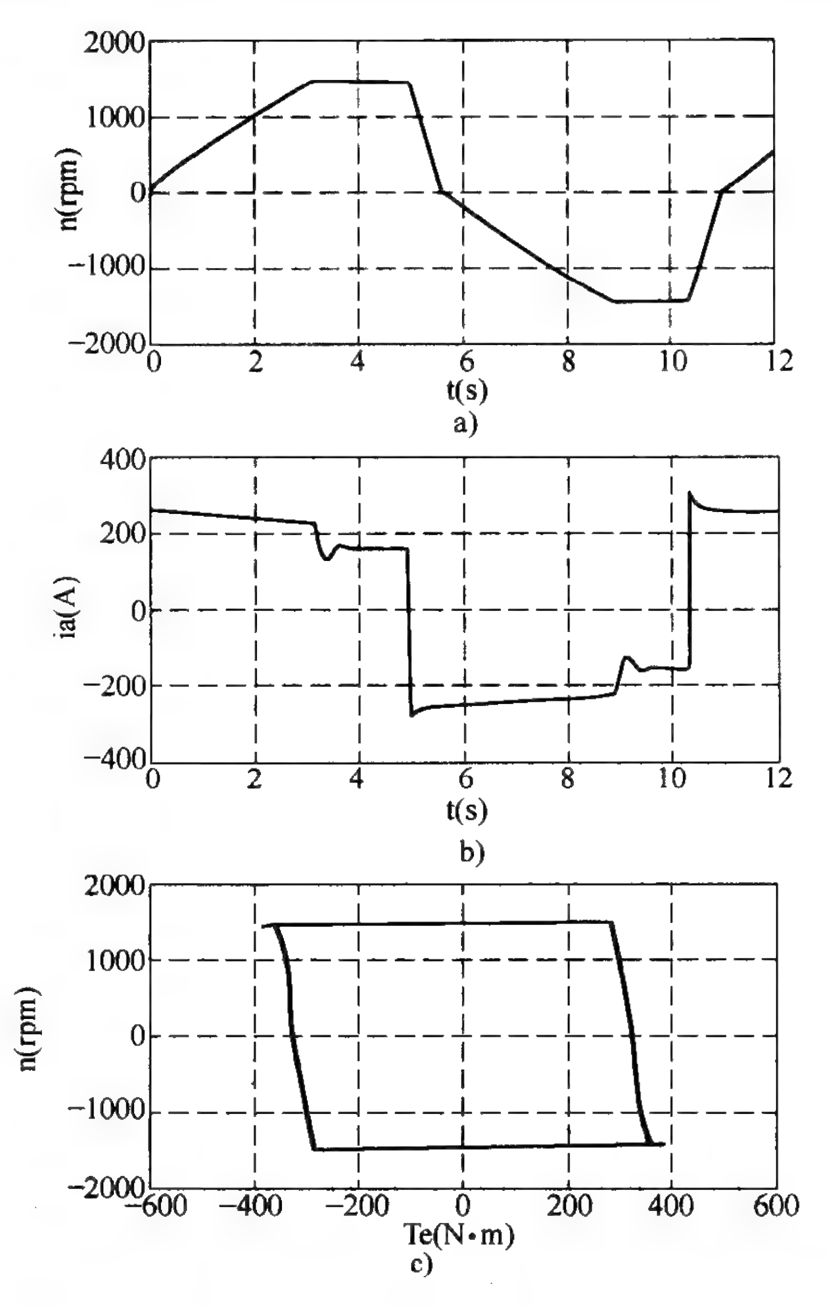


图 6-29　逻辑无环流直流可逆系统正反转过程的仿真结果

a）转速曲线　b）电枢电流　c）可逆过程的转矩-转速曲线

和图b所示为正反转过程中的转速和电枢电流曲线。电动机带载起动（T_L = 200N·m），电动机从正转起动到稳定运行（0～5s），给出反转指令后电动机经历正转制动到反转起动、反转运行的转速变化过程（5～10s），10s后系统又从反转切换到正转状态。图6-29c所示为正反转过程中，电动机四象限运行的转矩-转速曲线。图6-30所示为逻辑控制器输入和输出信号波形。

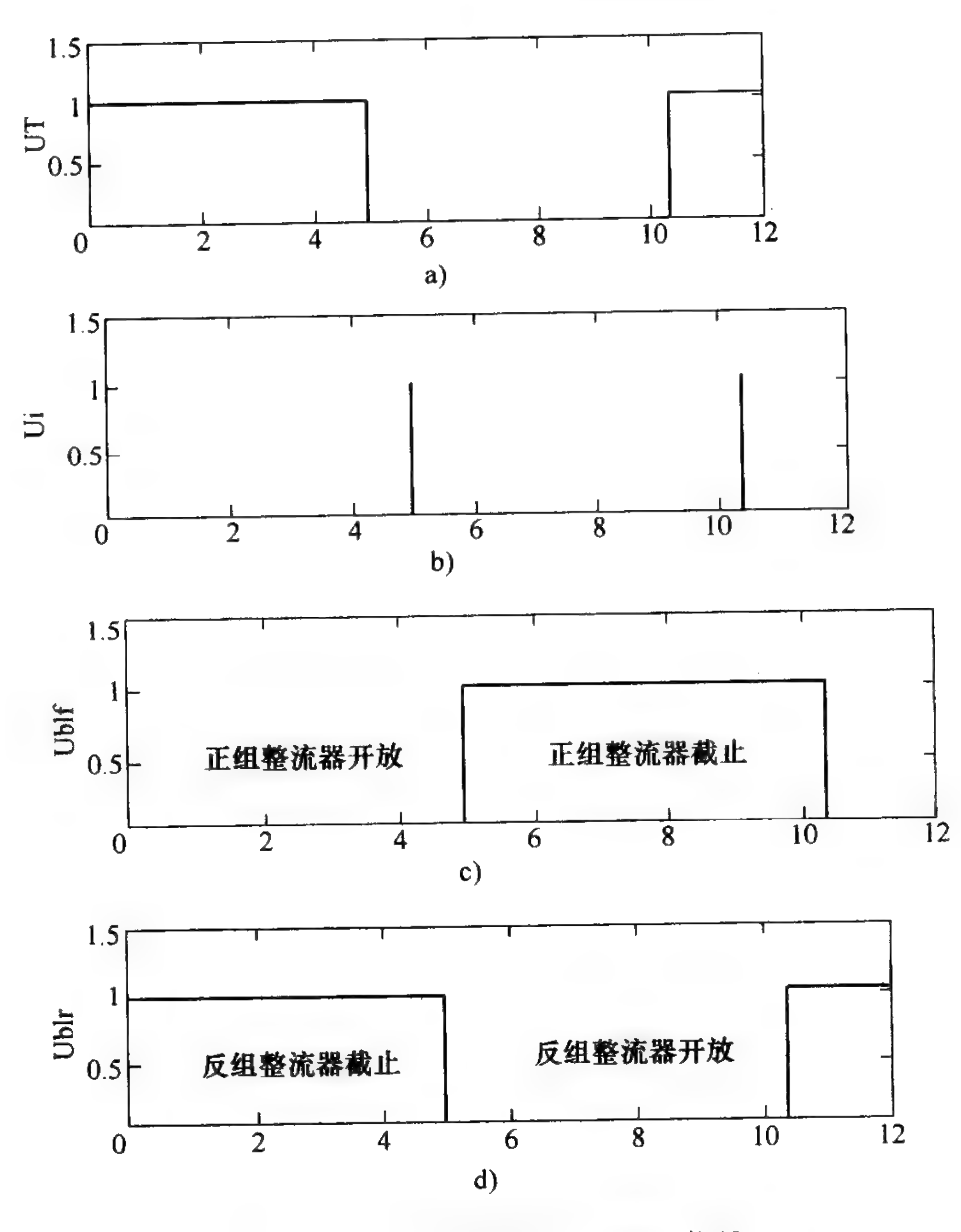


图6-30 逻辑控制器输入输出信号

a）转矩特性 b）零电流 c）正组整流器控制

d）反组整流器控制

6.5 H型主电路和直流PWM-M可逆调速系统的仿真

直流PWM-M调速系统近年来发展很快，直流PWM-M调速系统采用全控型电力电子器件，调制频率高，与晶闸管直流调速系统相比动态响应速度快，电动机转矩平稳脉动小，有很大的优越性，因此在小功率调速系统和伺服系统中

的应用越来越广泛。直流 PWM-M 调速系统与晶闸管调速系统的不同主要在变流主电路上，采用了脉宽调制（PWM）方式，转速和电流的控制和晶闸管直流调速系统一样。

直流 PWM-M 调速系统的 PWM 变换器有可逆和不可逆两类，而可逆变换器又有双极式、单极式和受限单极式等多种电路。这里主要研究 H 型主电路双极式的 PWM-M 调速的仿真，并通过仿真分析直流 PWM-M 可逆调速系统的工作过程。

6.5.1 H 型主电路仿真

直流 PWM-M 调速系统的主电路组成如图 6-31 所示，主电路由四个电力场效应晶体管 VF1 ~ VF4 和四个续流二极管 VD1 ~ VD4 组成 H 型连接组成。当 VF1 和 VF4 导通时，有正向电流 i_1 通过电动机 M，电动机正转；当 VF2 和 VF3 导通时，有反向电流 i_2 通过电动机 M，电动机反转。VF1 ~ VF4 驱动信号的调制原理如图 6-29 所示，在三角波与控制信号 u_{ct} 相交时，分别产生驱动信号 u_{b1}、u_{b4} 和 u_{b2}、u_{b3}。

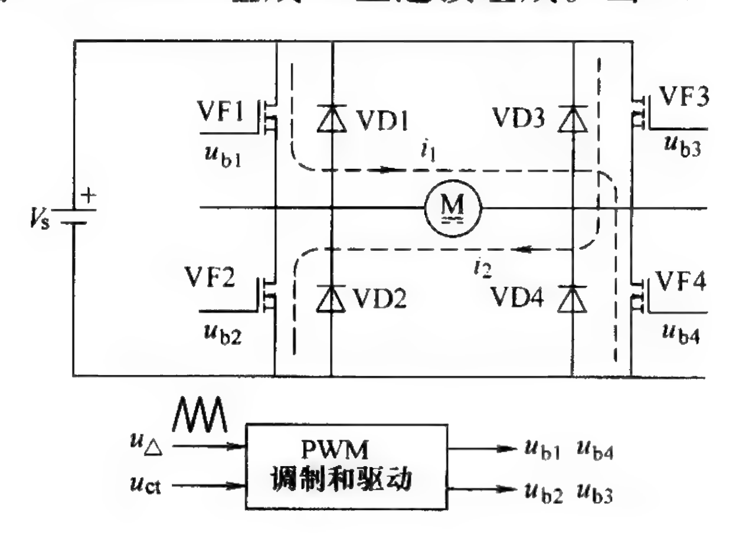


图 6-31 直流 PWM-M 调速系统主电路

图 6-31 所示直流 PWM-M 调速系统主电路（其波形图见图 6-32）的仿真模型如图 6-33 所示。图中，H 型变流器调用了多功能桥（Universal Bridge），其参数设为 2 相桥臂，abc 在交流输出端，开关器件为 MOSFET（见图 6-34）。当多功能桥模块参数设 abc 在交流输出端时本来是用于逆变，现在用于直流 PWM 变流时，其驱动信号发生电路需要另外设计。设计的驱动信号发生电路如图 6-35 所示，图中输入端 In1 接脉宽调制信号，输出端 Out1 输出四路 MOSFET 的驱动信号。脉宽调制由两个 PWM 发生器（PWM Generator）模块进行，其中上方的 PWM 发生器产生 VF1 和 VF2 的驱动信号，下方的 PWM 发生器产生 VF3 和 VF4 的驱动信号，为了使 PWM 发生器输出的驱动信号顺序与多功能桥的驱动顺序一致，模型中加入一个选择器模块（Selector），调整了脉冲序列。因为 MOSFET 有导通和关断时间，为了避免上下桥臂的两个管子同时导通和关断，造成桥臂的直通现象，需要有

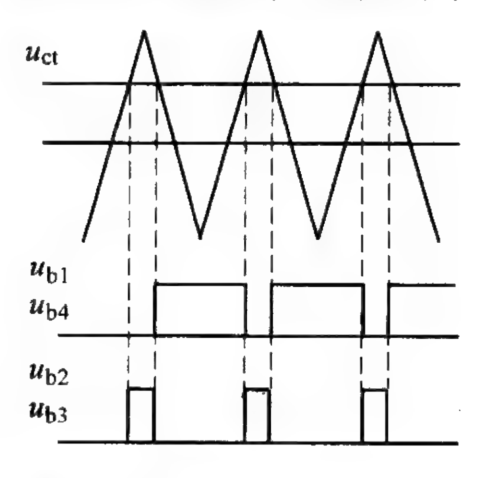


图 6-32 直流 PWM 调制波形图

“死时”限制，这里采取的办法是使下方的 PWM 发生器输入的控制信号为 $u_{ct}+0.001$，即将 u_{ct}略为抬高，使下方的 PWM 发生器输出信号变窄一些，这样上下桥臂的两个管子就不会同时导通和关断。该 PWM 驱动信号发生电路经打包后即形成图 6-33 中的 PWM 分支电路模块。

在主电路模型中控制信号通过互动开关与 PWM 分支电路模块连接，因此双击互动开关模块就可以选择控制信号 u_{ct}和 $-u_{ct}$，控制电动机正转或反转。

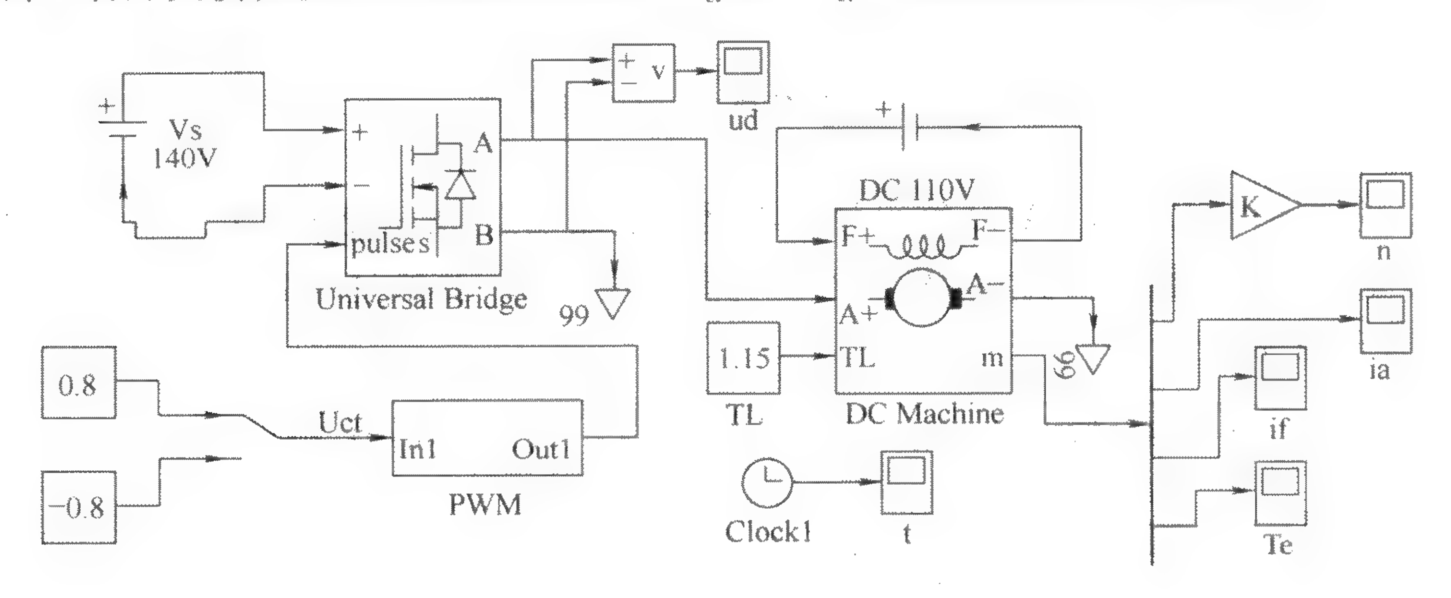


图 6-33　直流 PWM-M 调速系统模型

Block Parameters: Universal Bridge

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. For most applications the internal inductance should be set to zero.

Parameters

Number of bridge arms:

Port configuration: ABC as output terminals

Snubber resistance Rs (Ohms): 1e5

Snubber capacitance Cs (F): inf

Power Electronic device: MOSFET / Diodes

Ron (Ohms): 1e-3

Measurements: None

OK　Cancel　Help　Apply

图 6-34　多功能桥参数对话框

【例 6-4】　直流脉宽调速系统如图 6-33 所示，伺服电动机参数为 110V，2.9A，2400r/min，电枢电阻为 3.4Ω，电枢电感为 60.4mH，转动惯量为 0.014kg·m²，励磁电压为 110V，励磁电流为 0.5A。仿真该系统在额定负载时的工作情况。

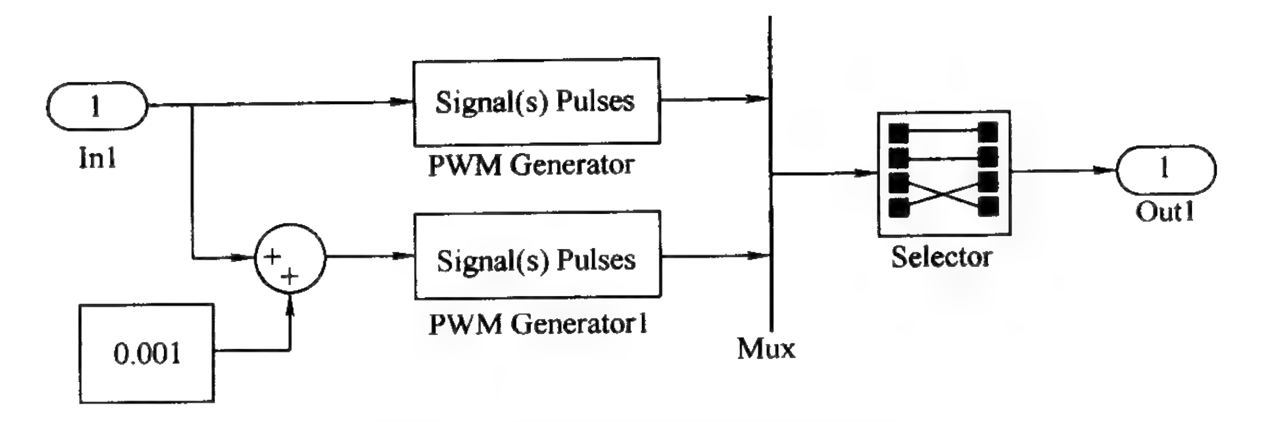


图 6-35　PWM 驱动信号发生电路

根据伺服电动机参数计算得伺服电动机励磁电阻 $R_f = 220\Omega$，$L_{af} = 0.797\text{mH}$（参见例 6-1）。将电动机参数输入电动机模块对话框。并通过常数模块输入额定负载转矩 T_L。

$$T_L = 9.55C_eI_a = 9.55 \times \frac{110 - 3.4 \times 2.9}{2400} \times 2.9\text{N·m} = 1.15\text{N·m}$$

a)　b)　c)　d)

图 6-36　直流 PWM-M 系统响应曲线

a）PWM 变流器输出电压瞬时值　b）PWM 变流器输出电压平均值

c）电动机转速　d）电动机电枢电流

在直流 PWM 模型中控制信号 u_{ct}的取值范围为 0 ~ 1，u_{ct}也就是双极性 PWM 的调制度 ρ，当取值为 0.8 时，PWM 变流器的直流电源电压 $V_s = U_n/\rho = 110V/0.8 = 140V$。

直流 PWM 模型按上述额定参数仿真的结果如图 6-36 所示，其中图 6-36a 所示为变流器输出电压的一部分（1 ~ 1.01s），电压波形呈良好的矩形波，如果不设一定的“死时”，由于上下桥臂管子的换流重叠现象，使输出电压呈梯形。图 6-36b 所示为输出电压的平均值，输出电压略高于 110V。图 6-36c 所示为伺服电动机的转速响应，转速上升平稳，这是 PWM 调制的特点。图 6-36d 显示了电动机起动过程中的电流曲线，起动电流最大值为 28A，约为额定电流的 7 倍。

6.5.2 直流 PWM-M 可逆调速系统仿真

直流 PWM-M 可逆调速系统的仿真模型如图 6-37 所示，模型在直流 PWM-M 系统主电路模型（见图 6-33）基础上增加了转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR，ASR 和 ACR 都采用带输出限幅的 PI 调节器。调节器参数取值见表 6-4。模型的其他设置与例 6-4 相同。

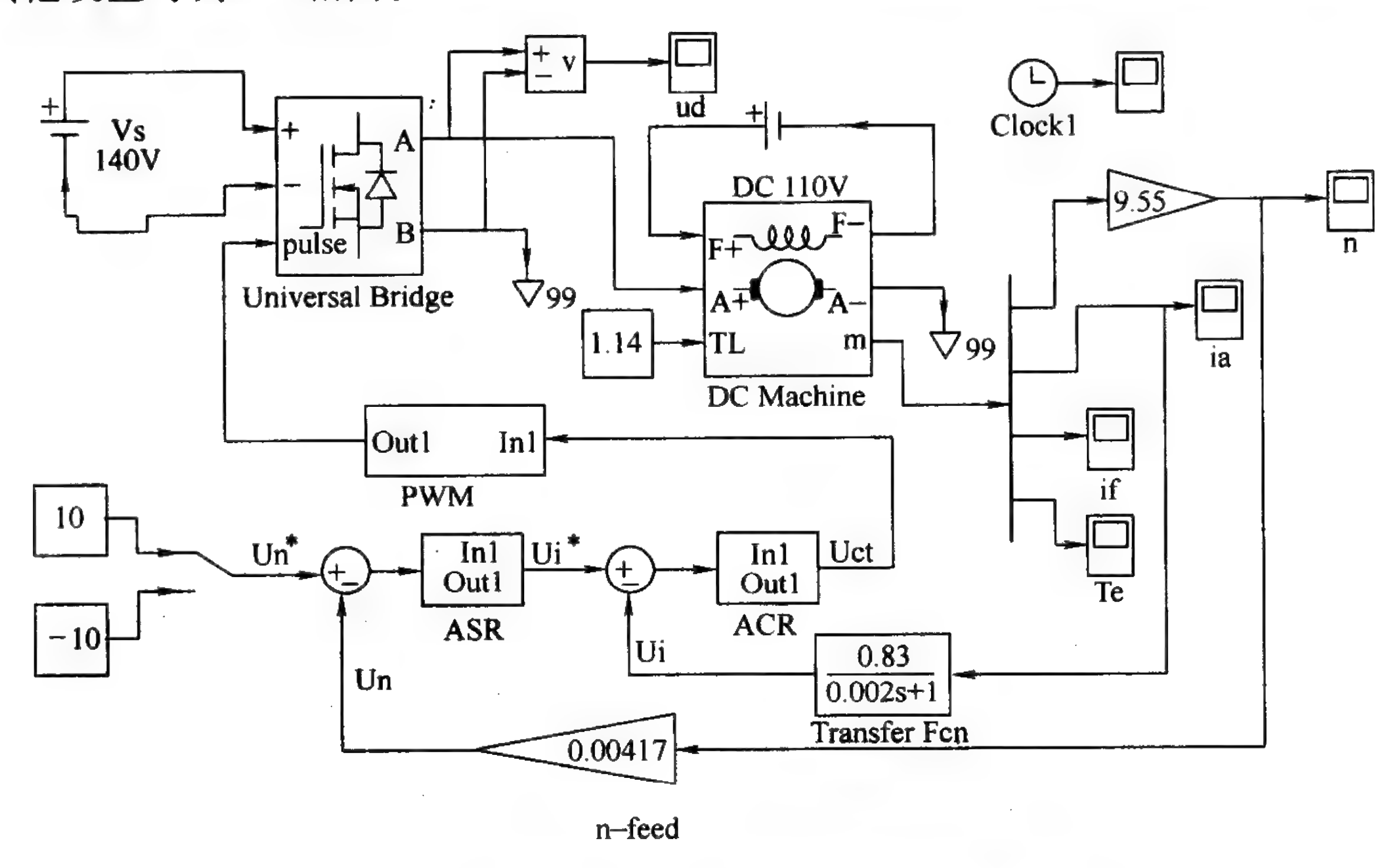


图 6-37　直流 PWM-M 可逆调速系统仿真模型

直流 PWM-M 可逆调速系统的仿真结果如图 6-38 所示。从图中可以看到，系统从正转起动至反转运行过程中转速（见图 6-38b）和电枢电流（见图 6-38c）对转速给定（见图 6-38a）的响应波形。在仿真中取电流的过载倍数 $\lambda = 3$，因此电动机的正转起动和制动、反转起动过程中始终保持着最大电流 12A 左右。在正

反转转速达到额定值 2400r/min 后，电流下降为 4A 左右。图 6-38d 所示为转速调节器输出，即电流的给定信号。图 6-38e 所示为电流调节器的输出信号，图 6-38f 为电流调节器输出信号的局部展开，电流调节器输出信号的波动反映了电流调节器的调节作用，不同电流调节器参数的波动情况不同，其的变化使变流器的脉宽随之调整，输出电压值也随着变化，使电流保持不变。

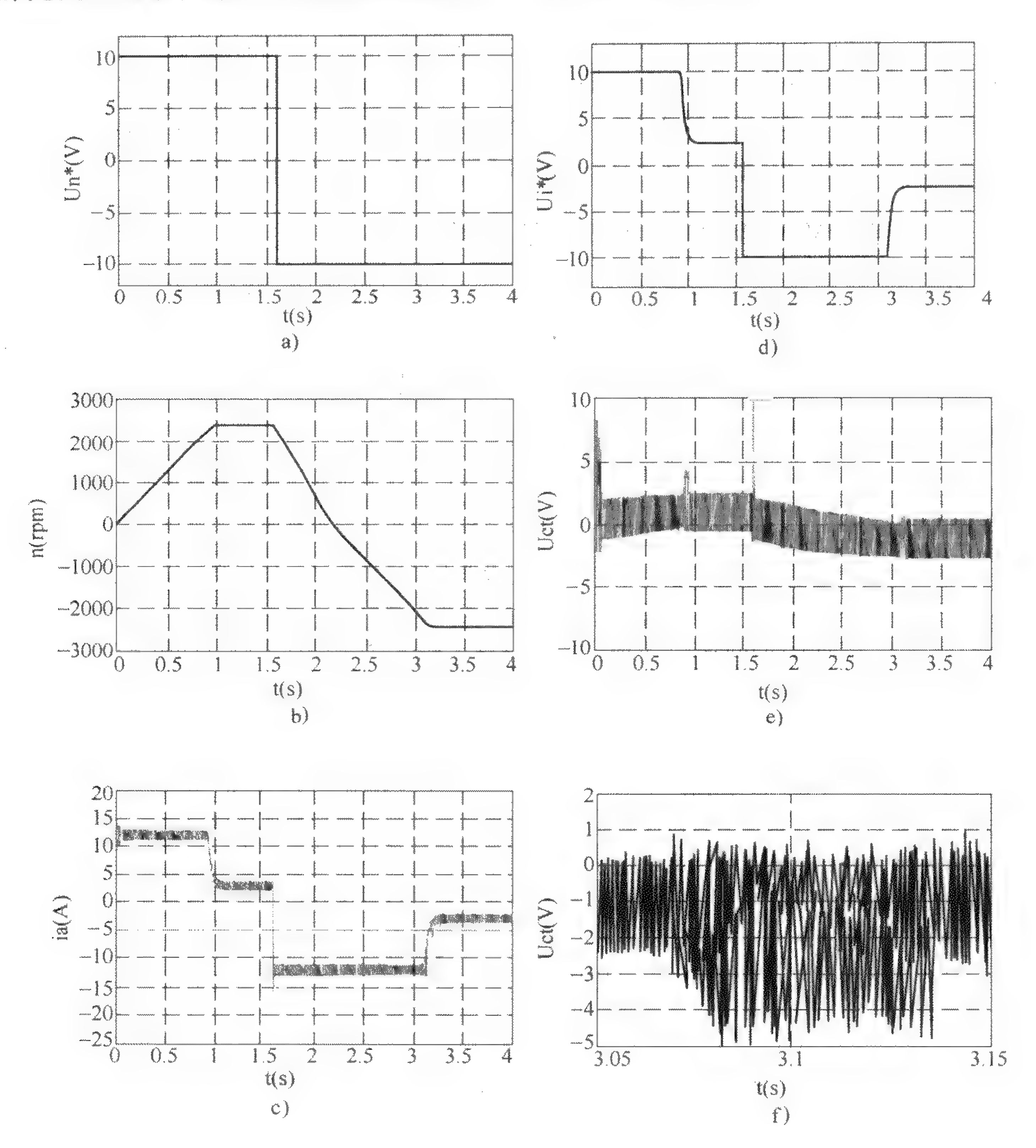


图 6-38　直流 PWM 可逆系统仿真结果

a）转速给定　b）电动机转速　c）电动机电枢电流　d）电流给定

e）电流调节器输出信号　f）电流调节器输出信号的局部展开

表 6-4 直流 PWM-M 可逆调速系统调节器参数

参　数	转速调节器 ASR	电流调节器 ACR
放大倍数	23.5	35.6
积分时间常数	0.52	0.003
调节器输出限幅	±10	±0.98
转速反馈系数	0.00417	
电流反馈系数		0.83

第7章　交流调速系统的仿真

自20世纪80年代以来交流调速发展很快，交流电动机具有维护简单，体积小重量轻等特点，随着电力电子交流调压、变频和控制技术的日趋成熟，交流调速在应用中越来越普遍。本章主要通过仿真，研究交流调速的性能和控制问题。

7.1　交流电动机减压软起动系统仿真

在有限供电系统中较大容量的交流电动机起动时，由于起动电流过大，会引起电网电压下降，而影响其他用电设备的正常工作，所以一般较大容量的交流电动机起动都采用减压起动方式，以减小起动电流。传统的减压起动方法有星-三角起动和自耦变压器起动等。现在应用晶闸管交流调压原理的软起动器已经大量面市，晶闸管软起动器可以通过电压的调节，限制起动电流，并且使电动机有较大的起动转矩，在起动结束后再经过接触器切除软起动器，让电动机直接连接三相电源完成起动过程。晶闸管软起动器的电气原理如图7-1所示。软起动电路由三相晶闸管调压电路和软起动控制器（给定积分器）、触发器等组成，起动时通过控制器使晶闸管控制角从大到小变化，而电动机电压从小到大逐次上升。其仿真电路如图7-2所示。通过仿真可以研究软起动器的控制曲线，电流限制效果和电动机转矩的情况。

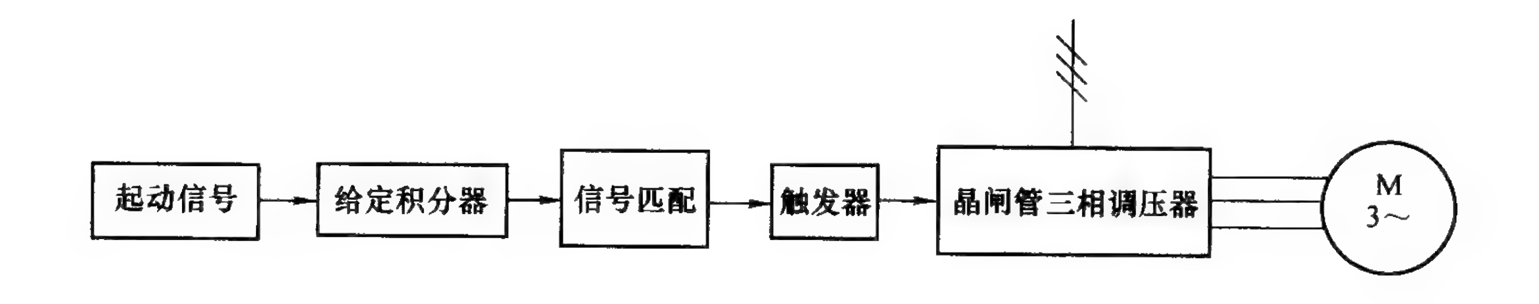


图7-1　软起动器原理图

在模型中，双向晶闸管模块VT和触发器模块pulse请参见第5章5.4节，异步电动机模块（ac motor）使用模型的蕴含参数。三相电阻Ra，Rb，Rc仅是为检测交流调压器输出的相电压而设置的，通过多路检测器（Multimeter）检测电阻

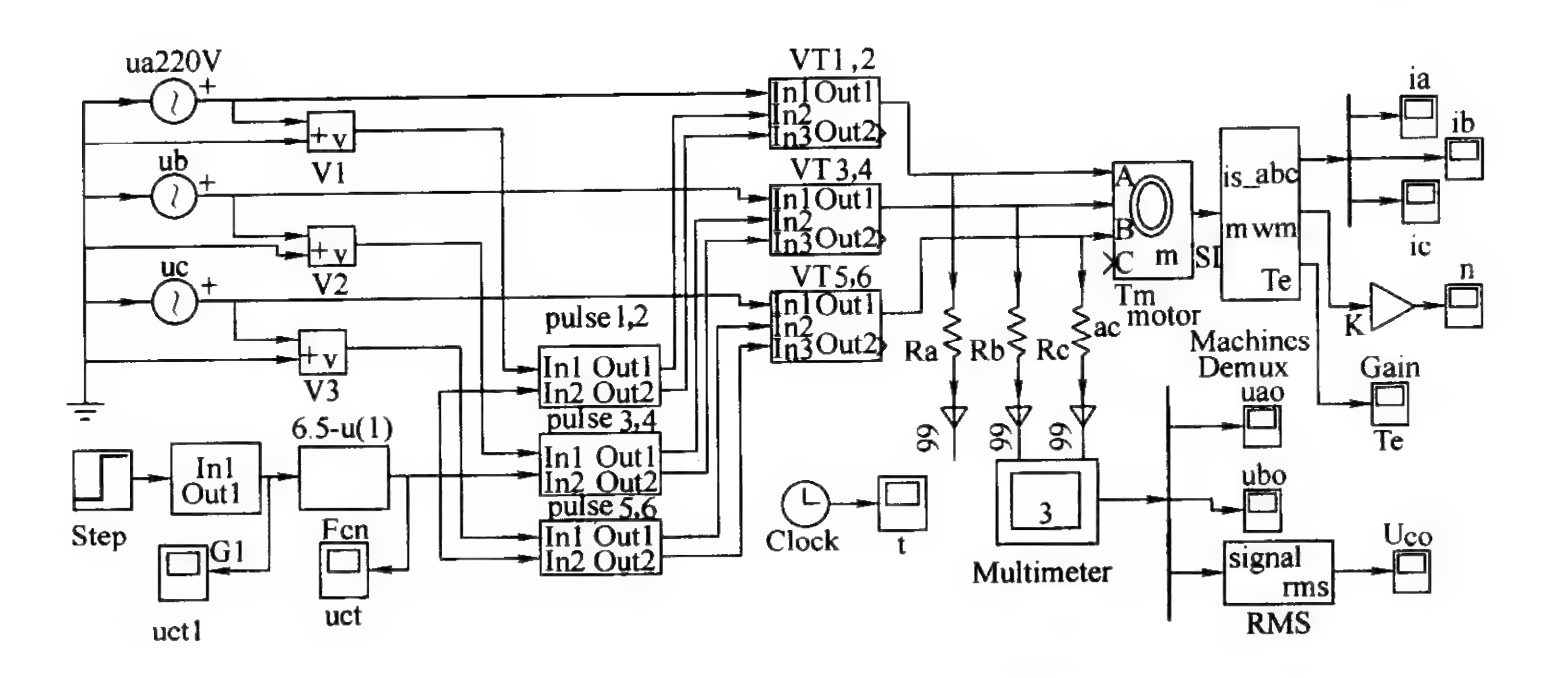


图 7-2　交流电动机软起动器的仿真模型

两端电压来观察交流调压器输出电压波形。模型的控制部分由 Step、GI 和 Fcn 三个模块组成，其中 Step 给出阶跃起动信号，GI 模块用于设定起动曲线，函数 Fcn 用于使控制信号与触发器输入信号要求相匹配。给定积分 GI 分支模块的构成如图 7-3 所示。其中放大器（Gain）的作用是使积分时间常数不受放大器输入偏差大小的影响，所以放大倍数可以取大一些，本例中放大倍数取为 1000。限幅器（Saturaction）用于设定积分时间常数，调节限幅器的上下限可以调节给定积分器输出曲线的上升斜率。晶闸管三相调压器给电动机供电时，晶闸管控制角的移相范围受一定限制，当控制角较大时，调压器输出电压过低，电动机起动转矩太小，电动机不能起动；当控制角小于电动机功率因数角时，调压器失去调压作用，调压器输出全电压；本例调压器触发模块移相控制电压 U_C 与控制角 α 的关系如图 7-4 所示。综合以上因素在控制环节中设置了函数匹配环节（Fcn），匹配关系为

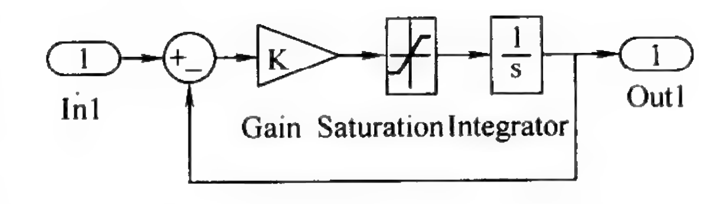


图 7-3　给定积分 GI 分支模块

$$f[u(1)] = 6.5 - u(1)$$

图 7-4　移相特性

式中，6.5 为能使电动机起动的最小控制电压；u（1）为给定积分器输出。

利用该交流电动机软起动模型对电动机空载起动过程进行仿真，并与电动机全压直接起动相比较，其结果如图 7-5 所示。比较图 7-5b 和图 7-5e 可以看到，采用软起动方式，电动机的起动电流显著减小，全压起动时起动电流峰值可以达到 200A，而软起动方式限制起动电流峰值在 30A 左右，全压起动的起动时间短，软起动达到额定转速的时间要长，但是起动过程更平稳。

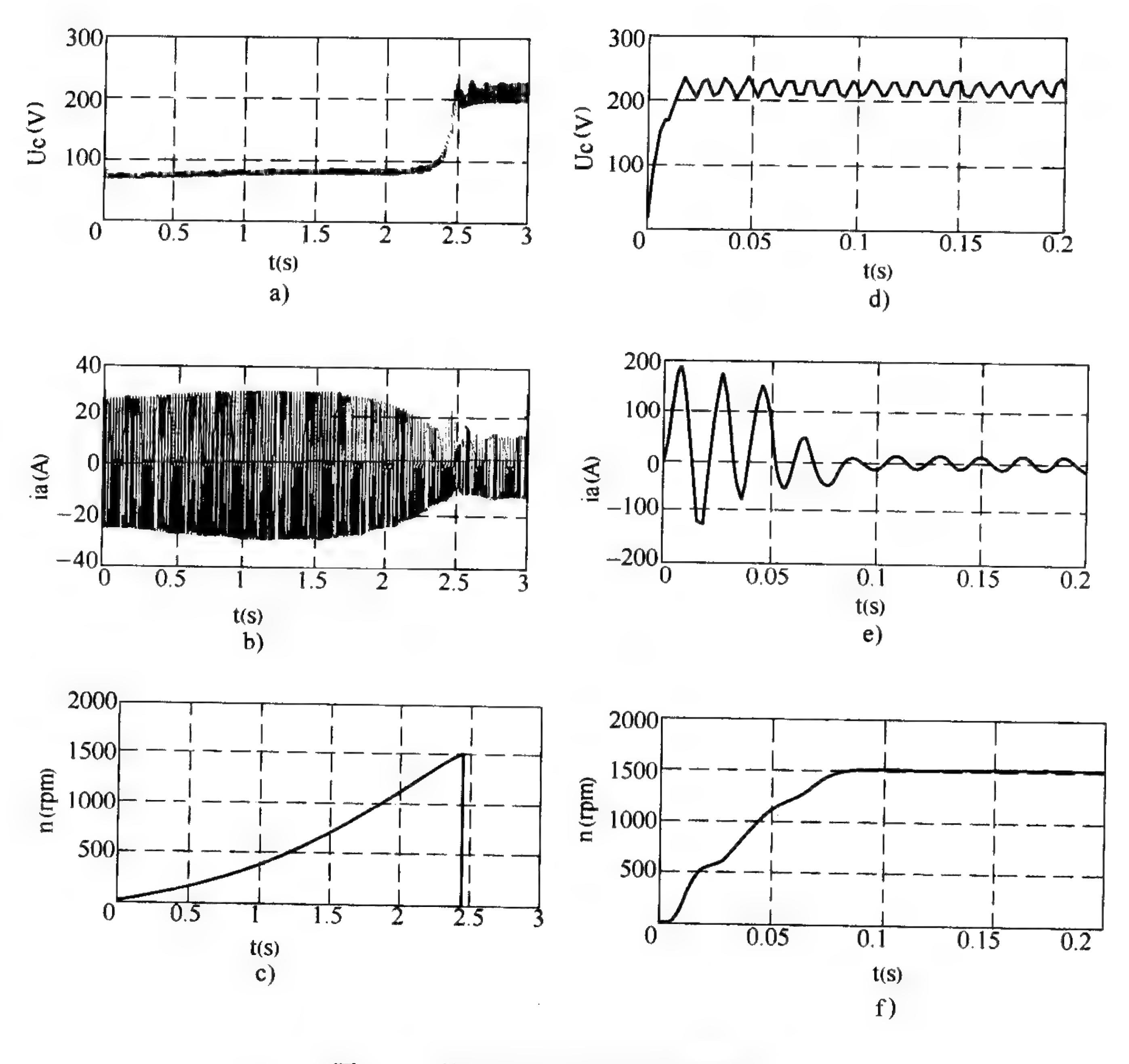


图 7-5　软起动和全压起动过程比较

a）软起动电动机输入电压有效值　b）软起动电动机电流瞬时值

c）软起动电动机转速变化过程　d）全压起动电动机输入电压有效值

e）全压起动电动机电流瞬时值　f）全压起动电动机转速变化过程

7.2　转速开环恒压频比控制的交流异步电动机调速系统仿真

转速开环恒压频比控制是交流电机变频调速最基本的控制方式，一般变频调速装置都带有这项功能，恒压频比的转速开环工作方式能满足大多数场合交流电动机调速控制的要求，并且使用方便，是通用变频器的基本模式。采用恒压频比控制，在基频以下的调速过程中可以保持电动机气隙磁通基本恒定，在相同转矩条件下电动机的转差率基本不变，所以电动机有较硬的机械特性，使电动机有较好的调速性能。但是如果频率较低，定子阻抗压降所占比重较大，电动机难以保持气隙磁通不变，电动机的最大转矩将随频率的下降而减小。为

了使电动机在低频低速时仍有较大的转矩，需要进行低频电压补偿，在低频时适当提高定子电压，使电动机仍有较大的转矩。恒压频比变频调速系统的基本原理结构如图 7-6 所示，系统由升降速时间设定、U/f 曲线、SPWM 调制和驱动等环节组成。其中升降速时间设定用来限制电动机的升频速度，避免转速上升过快而造成电流和转矩的冲击，起软起动控制的作用。U/f 曲线用于根据频率确定相应的电压，以保持压频比不变（U/f= 常数），并在低频时进行适当的电压补偿。SPWM 和驱动环节将根据频率和电压要求产生按正弦脉宽调制的驱动信号，控制逆变器以实现电动机的变压变频调速。

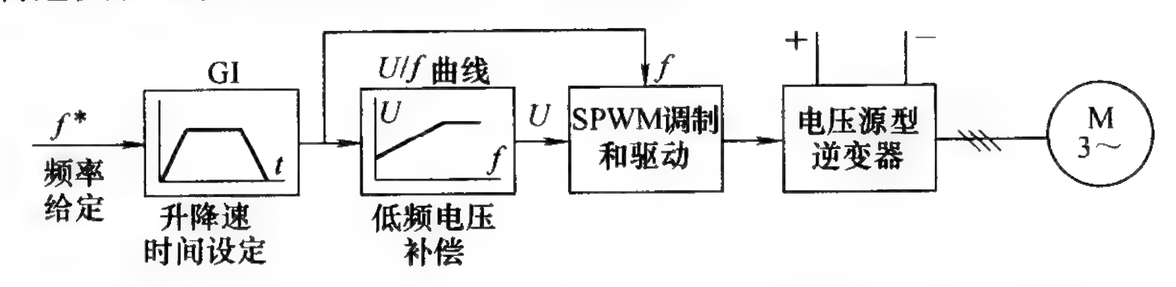


图 7-6　恒压频比变频调速系统原理图

转速开环变频调速系统的仿真模型如图 7-7 所示。图中逆变器、电动机、SPWM 生成等主要模块提取路径见表 7-1。

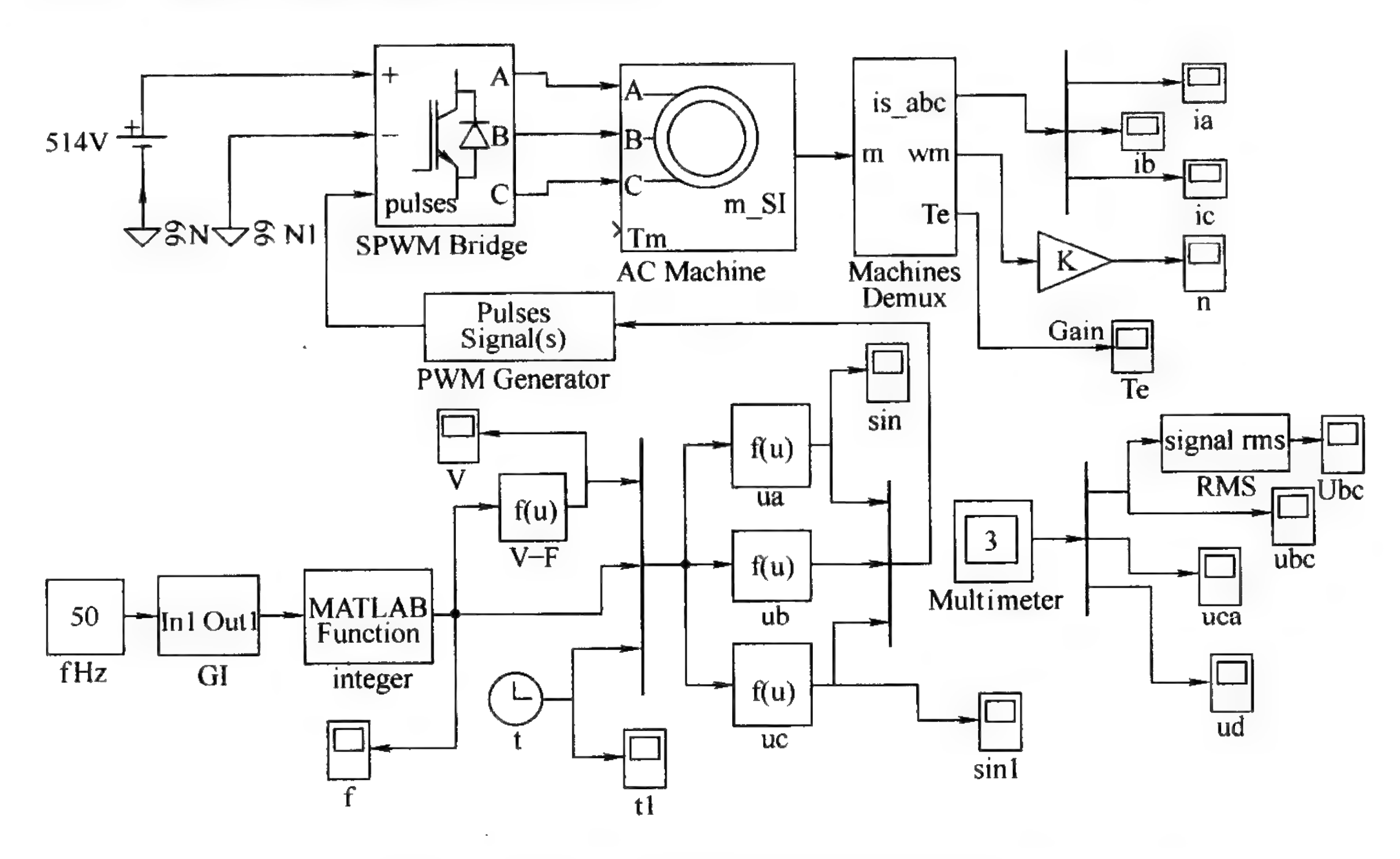


图 7-7　转速开环变频调速系统的仿真模型

其中给定积分器的模型与图 7-3 相同，设定恰当的积分时间常数可以控制频率上升的速率，从而设定电动机的起动时间。在给定积分器的后面插入了一个取整环节（integer），使频率为整数。V-F（见图 7-7）曲线（即图 7-8 中的 U-f 曲线）由函数发生器 Fcn 产生，根据频率确定相应的电压值，其函数表达式为

表 7-1 转速开环变频调速系统模型模块提取路径

模块名称	标识名称	提取路径
交流异步电动机	ac motor	Power system blockset/Machine/Asynchronous
电动机测量单元	Machine measurement	Power system blockset/Machine/Measurement Demux
逆变器	SPWM Bridge	Power system blockset/Power Electronice/Universal Bridge
频率给定	fHz	Simulink/source/constant
取整数	integer	Simulink/functions/MATLAB Fcn
SPWM 生成	PWM Generator	Power system blockset/Extra Library/control blocks/PWM generator
V-F	Fcn	Simulink/functions/Fcn
三相调制正弦信号	ua、ub、uc	Simulink/functions/Fcn
三相信号合成	Demux	Simulink/signals/Mux

$$U = \frac{U_N}{f_N}f + U_0$$

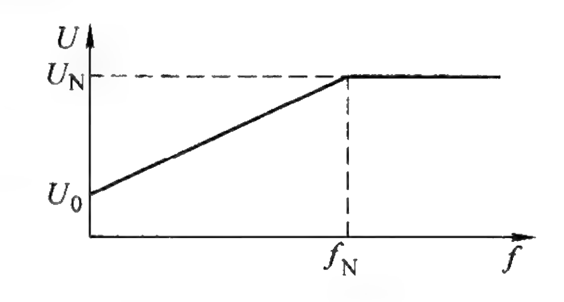


图 7-8 U-f 曲线

式中，U_N 为电动机额定电压，f_N 为电动机额定频率，U_0 为初始电压补偿值。电压 U、频率 f、时间 t 经汇总为一维矢量 $x = [u(1), u(2), u(3)]$，其中的 $u(1)$、$u(2)$、$u(3)$ 以次表示电压、频率和时间。函数模块 ua、ub、uc 分别用于产生三相调制信号 u_a、u_b、u_c，即

$$u_a = u(1)^* \sin[2^* \text{pi}^* u(2)^* u(3)]$$

$$u_b = u(1)^* \sin\left[2^* \text{pi}^* u(2)^* u(3) - \frac{2^* pi}{3}\right]$$

$$u_c = u(1)^* \sin\left[2^* \text{pi}^* u(2)^* u(3) - \frac{4^* pi}{3}\right]$$

根据三相调制信号，由 PWM 发生器产生逆变器驱动脉冲，经逆变器得到频率和幅值可调的三相电压，使交流电动机按给定要求起动和运行。模型中的其他参数设定见表 7-2。

在给定频率为 50Hz，起动时间为 5s 的情况下，仿真结果如图 7-9 所示。其中图 7-9a 所示为电动机输入的一相线电压（有效值），图 7-9b 所示为转速变化曲线，图 7-9c 所示为转速-转矩特性。从图中可以看到电动机电压基本按 U-f 曲线的设定上升，但是起动中转速和转矩的波动很大。

表 7-2　转速开环变频调速系统模型参数

模块	参数	设置值	模块	参数	设置值
给定积分器 GI	Gain	1e4	逆变器直流侧电压		514 V
	Saturation	± 10			
取整 integer		round	PWM 发生器	载波频率	1500 Hz
仿真算法		Ode23tb	仿真精度		1e-3

为分析转速和转矩产生较大波动的原因，将起动过程中一段（3～4s）的电压、转速等波形展开如图 7-10 所示。从逆变器输出电压的波形（见图 7-10b）中可以看到，输出电压的频率变化呈现出不规则，电压频率不是均匀地上升，中间部分时段电压波形的周期变大，频率减小。将起动过程中的升频曲线（见图 7-10d）和相应时段的正弦调制信号（见图 7-10c），以及转速曲线（见图 7-10a）相比较，在频率变化的边界上，正弦调制信号和转速都发生了畸变，这是因为频率变化的时刻不一定是发生在调制信号一个完整周期的末尾，在调制正弦信号一周期尚未结束时，频率发生了变化就可能使下一周期信号的前半周期变宽或变窄，使相应的一周期频率减小或增加。进一步比较频率变化时刻的三相电压波形，这时的三相电压的相序也可能异常，出现瞬时的负相序，电动机也产生了负的转矩，从而使电动机的转矩和转速发生急剧波动。延长起动时间，波动的情况可以减小，但是波动

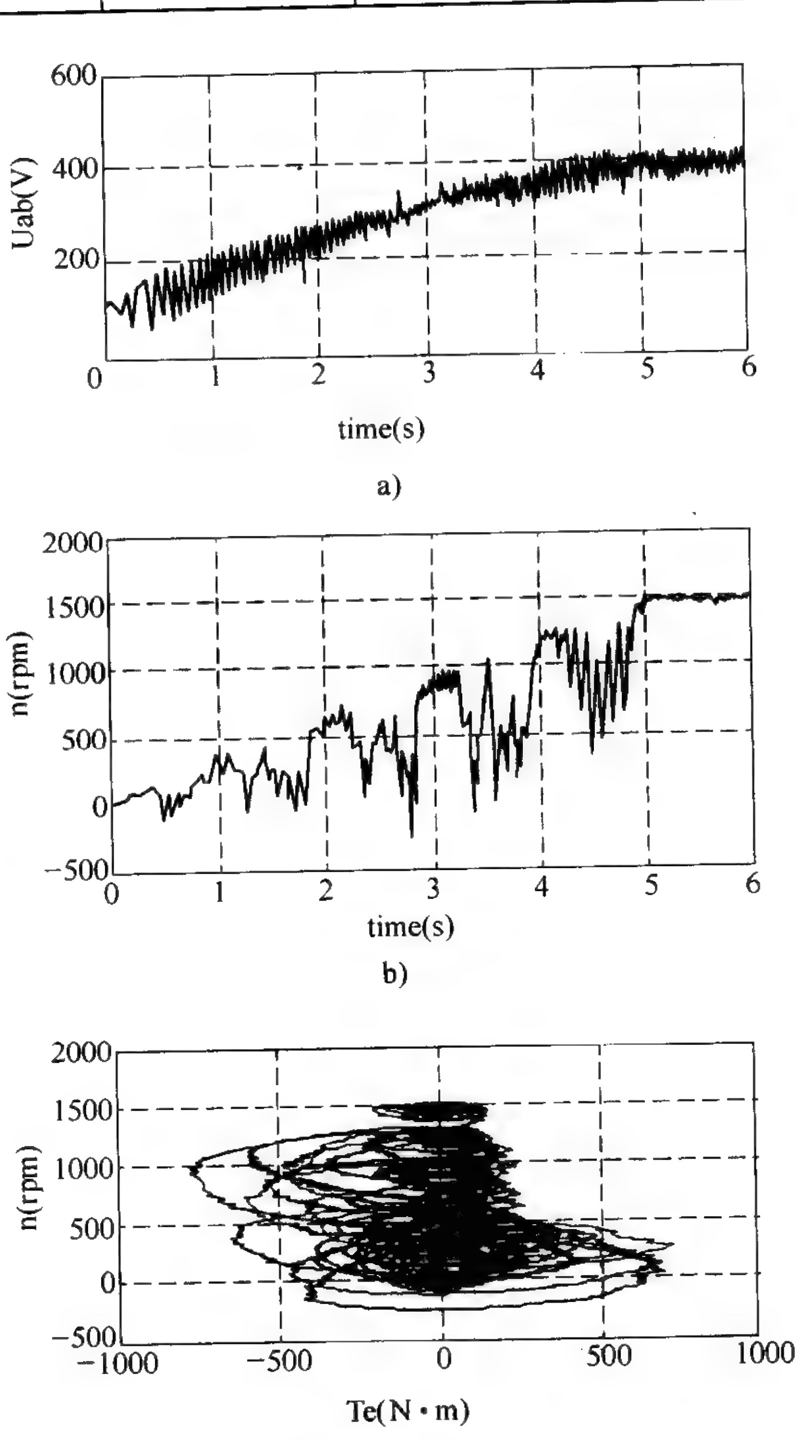


图 7-9　转速开环变频调速系统仿真结果
a）逆变器输出线电压　b）转速波形
c）转速－转矩特性

还是存在的。如果起动时间设定过小，在正弦一周内发生多次频率的变化，还可以出现增频现象，使逆变器输出频率超过设定频率（50Hz），电动机转速出现超调。因此采用等时间间隔的升频过程，都难以完全避免输出电压周期不规则的现象，工程上称之为“跳频”现象。

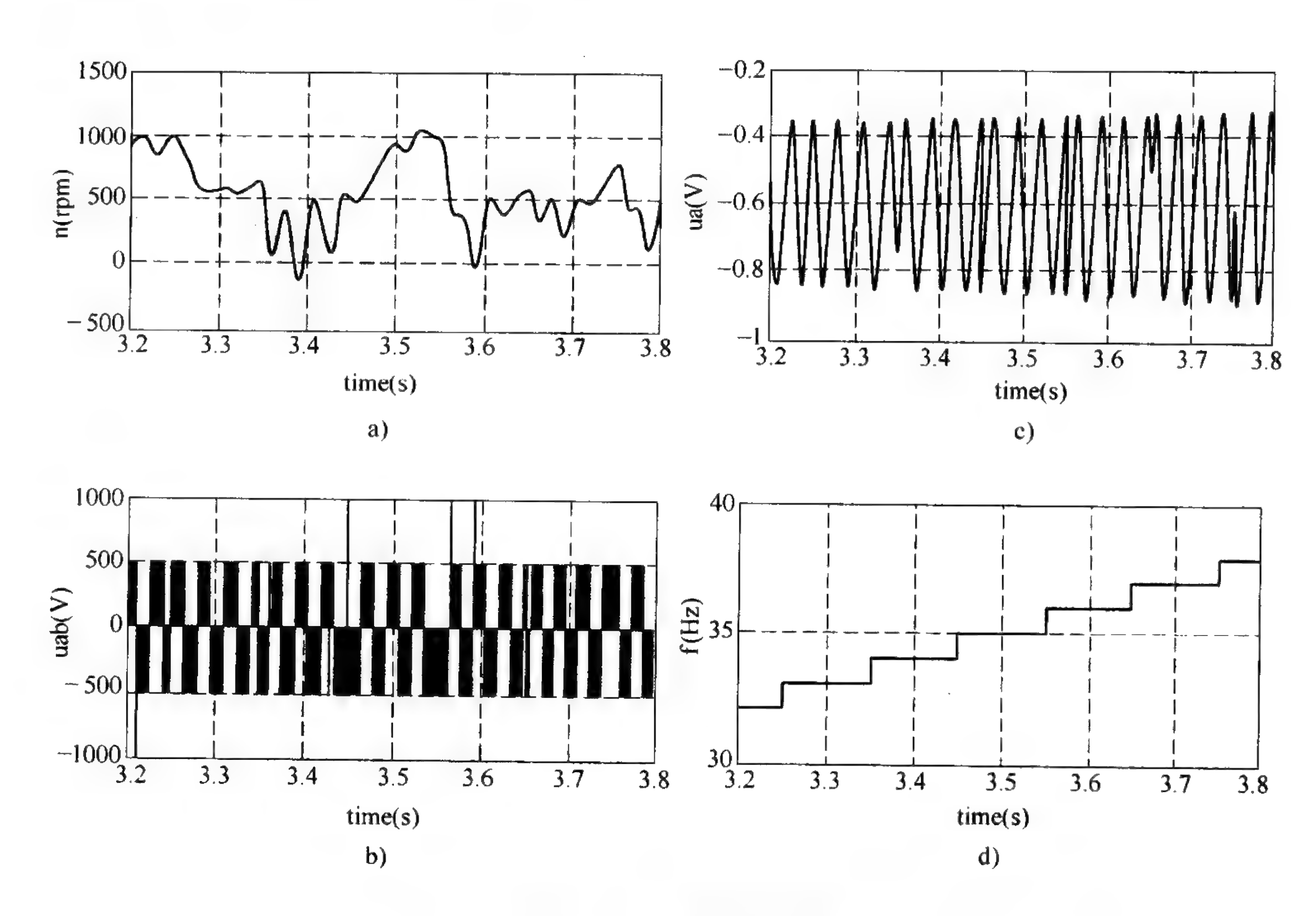


图 7-10　转速开环变频调速系统起动分析

a）转速波形　b）逆变器输出电压瞬时值　c）正弦调制信号　d）频率上升曲线

7.3　空间矢量的坐标变换

矢量变换是简化交流电机复杂模型的重要数学方法，是交流电机矢量控制的基础。矢量变换包括三相静止坐标系和两相静止坐标系的变换（简称 3s/2s 变换，见图 7-11）、两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换（简称 2s/2r 变换），以及直角坐标和极坐标的变换（K/P 变换）等。矢量变换是一组矩阵表达式，读者往往不易建立数学变换的物理概念，而矢量变换的仿真可以帮助实现这一点，从而加深读者对矢量变换物理意义的认识。

图 7-11　3s/2s 变换

7.3.1 三相静止坐标系和两相静止坐标系的变换

在交流电机中三相对称绕组通以三相对称电流可以在电机气隙中产生空间旋转的磁场，在功率不变的条件下，按磁动势相等的原则，三相对称绕组产生的空间旋转磁场可以用两相对称绕组来等效，三相静止坐标系和两相静止坐标系的变换则建立了磁动势不变情况下，三相绕组和两相绕组电压、电流和磁动势之间的关系。设 i_α、i_β 为两相对称绕组的电流，i_A、i_B、i_C 为三相对称绕组的电流，它们间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{3/2} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{7-1}$$

式中，i_0 是为便于逆变换而增加的一相零序分量。$\boldsymbol{C}_{3/2}$ 为 3s/2s 变换矩阵，上述变换同样适用于电压和磁动势的变换，且它们的逆变换也存在。

7.3.2 两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换

两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换是用于建立两相静止绕组和两相旋转绕组间电压或电流之间的关系。如图 7-12 所示，$L_\alpha L_\beta$ 是静止 α-β 坐标系的两个绕组，简称静止绕组，L_d、L_q 是 d-q 旋转坐标系上的两个绕组，简称旋转绕组。d-q 旋转坐标系的旋转速度是任意的，这是旋转变换的一般情况。如果静止绕组产生的旋转磁动势角速度是 ω_1，则有

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{n_p}$$

式中，f 为静止绕组电流频率，n_p 为电机极对数。

图 7-12 2s/2r 变换

d-q 旋转坐标系的旋转速度是 ω，则旋转坐标系上旋转绕组中的电流角频率应为 $\omega_1 - \omega$。如果旋转坐标系的旋转速度 $\omega = \omega_1$，则旋转绕组中的电流角频率为零，即旋转绕组中的电流为直流，这也就是说经过如此的坐标变换，交流电机可以和直流电机之间建立等效关系，使交流电机可以用直流电机的控制模式进行控制，这是交流电机矢量控制的重要思路。

两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{2r/2s} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{7-2}$$

式中，φ 为 d-q 坐标系 d 轴与 α-β 坐标系 α 轴之间的夹角 $\varphi = \int \omega \mathrm{d}t$，则两相旋转到两相静止的变换矩阵为

$$C_{2r/2s} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

通过逆变换也可以得到两相静止到两相旋转的变换矩阵为

$$C_{2s/2r} = C_{2r/2s}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

如果旋转坐标系以同步角速度旋转时，即 $\omega = \omega_1$，则 d-q 坐标系也可改为由 M-T 坐标系来表示，这时仅需要将变量的下标由 d、q 改为 m、t 即可。

7.3.3 三相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换

在得到三相静止坐标系到两相静止坐标系的变换和两相静止到两相旋转的变换矩阵后，也可以得到三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = C_{2s/2r}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C_{2s/2r}C_{3s/2s}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = C_{3s/2r}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

式中，三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换矩阵为

$$C_{3s/2r} = C_{2s/2r}C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos(\varphi - 120°) & \cos(\varphi + 120°) \\ -\sin\varphi & -\sin(\varphi - 120°) & -\sin(\varphi + 120°) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

相应的两相任意旋转坐标系到三相静止坐标系的变换矩阵为

$$C_{2r/3s} = C_{3s/2r}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\varphi - 120°) & -\sin(\varphi - 120°) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\varphi + 120°) & -\sin(\varphi + 120°) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

这里需要指出的是，静止坐标系的静止是相对的概念，静止是指坐标系对与人的位置是不动的，如果三相坐标系本身在旋转，这相当异步电动机转子的工作情况，转子相对于人静止位置的旋转角速度为 ω_r，转子三相绕组产生的旋转磁场旋转角速度 ω_2 与定子三相绕组产生的旋转磁场旋转角速度 ω_1 相对转速为 $\omega_1 - \omega_2$，即异步电动机的转差 $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$，因此，上述三相静止/二相旋转的变换应用于转子时，影响的仅仅是其中二相静止/二相旋转变换的转角 φ，因

为 φ 是旋转坐标系与静止坐标系的位置角 $\varphi = \int \omega \mathrm{d}t$ ，考虑到现在静止坐标系也在旋转，因此转角 φ 需要修正。

7.3.4 矢量变换的仿真

三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换及其反变换已经建立在 power system 模型库中，提取路径为 power system blockset / extra library / measurements / abc_ to_ dq0 transformation（dq0_ abc transformation）。矢量变换的仿真以下例说明。

【例 7-1】 观察三相电压经 3s/2s 和 3s/2r 变换后的结果，三相电压为 220V、50Hz。

建立的观察三相电压 3s/2s 和 3s/2r 变换的仿真模型如图 7-13 所示。图中调用了两个 abc_ to_ dq0 transformation 模块，调用的 abc_ to_ dq0 模块有两个输入端和一个输出端。输入端 abc 连接需变换的三相信号，sin_ cos 输入端为 d-q 坐标系 d 轴与静止坐标系 A 轴之间夹角 φ 的正、余弦信号，输出端 dq0 输出变换后的 d 轴和 q 轴分量以及 0 轴分量。在模型中三相电压信号由可编程信号源（3 - phase programmable source）产生，夹角 φ 由时钟（Clock）、常数（Constant）模块产生 $\varphi = \omega = 2\pi ft$ ，并经 sin、cos 模块产生正、余弦信号。

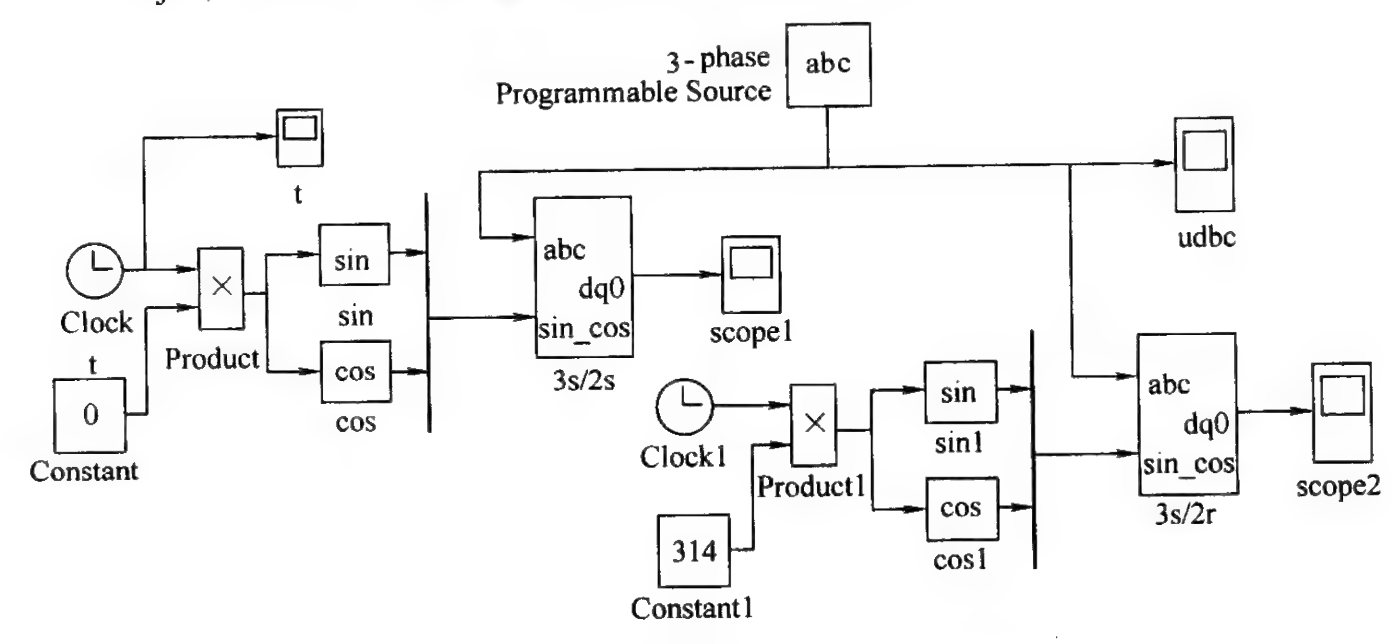


图 7-13 三相电压的 3s/2s 和 3s/2r 变换模型

图中的两个 abc_ to_ dq0 模块，一个用于 3s/2s 变换，另一个用于 3s/2r 变换。用于 3s/2s 变换时，设置常数模块值为零，即 $\varphi = \omega t = 0$，这意味着 d-q 坐标系的 d 轴与静止坐标系 A 轴重合，d-q 坐标系不旋转，这时 d-q 坐标系已蜕化为静止的 α-β 坐标系，abc_ to_ dq0 模块现在实现的是 3s/2s 变换。用于 3s/2r 变换时，设置常数模块值为 314，即 $\omega t = 2\pi f = 2\pi \times 50\text{Hz}$，仿真结果如图 7-14 所示。其中图 a 为变换前的三相电压，图 b 为经 3s/2s 变换后静止二相坐标系上的电压波形，

这二相电压互差 90°。图 c 为经 3s/2r 变换后旋转二相坐标系上的电压波形，由于所选角频率 $\omega = 2\pi f$，与电源角频率同步，所以在二相同步旋转坐标系上的电压已经是直流。

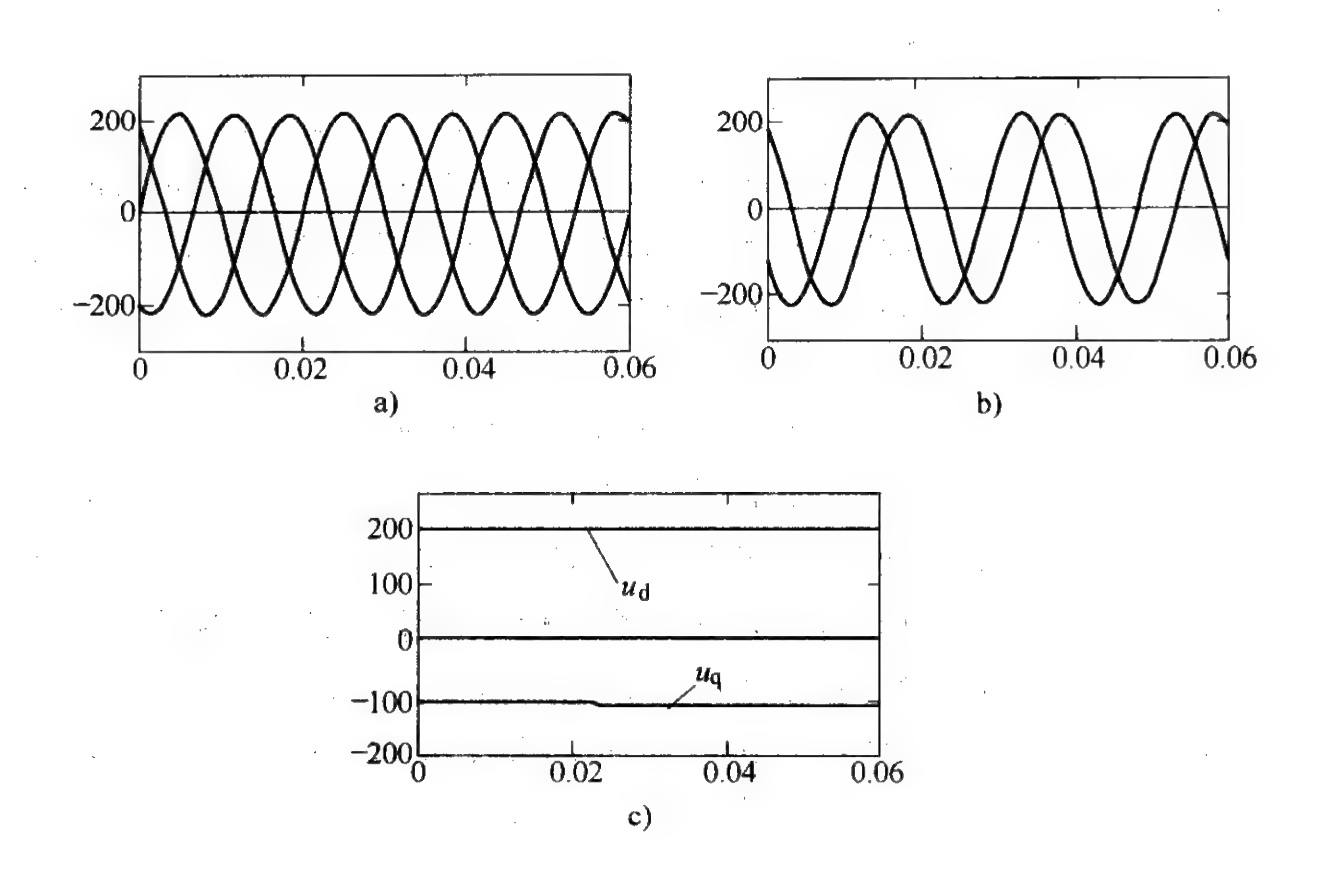


图 7-14 电压变换波形

a）变换前的三相电压波形 b）经 3s/2s 变换后的电压波形

c）经 3s/2r 变换后的电压波形

7.4 交流异步电动机的磁链观察

交流异步电动机的磁场控制是调速控制中的关键问题，在基频以下调速时，无论按稳态模型还是动态模型控制都需要保持电动机气隙磁通恒定，在基频以上调速时需要弱磁控制。异步电动机的励磁回路是非独立的，定子绕组输入的电流包含转矩分量和励磁分量两部分，这给异步电动机的控制带来很大的困难。如果按转子磁场的定向控制，则需要知道转子磁场的大小和位置，因此，对电动机磁场进行实时控制，首先需要检测磁场。电动机磁场的直接检测，由于受到工程和技术条件的限制难以实现，一般采用计算的方法，即采用磁链模型进行观测。本节通过对磁链模型的仿真，观察磁链计算的效果。

7.4.1 转子磁链计算的电流模型

7.4.1.1 在两相静止坐标系上的转子磁链电流模型

异步电动机在两相静止坐标系上的电压方程式为

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega L_m & R_r + L_r p & \omega L_r \\ -\omega L_m & L_m p & -\omega L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \tag{7-3}$$

式中，$u_{s\alpha}$、$u_{s\beta}$为两相静止坐标系上两相定子绕组电压；$u_{r\alpha}$、$u_{r\beta}$为两相静止坐标系上两相转子绕组电压；$i_{s\alpha}$、$i_{s\beta}$为两相静止坐标系上两相定子绕组电流；$i_{r\alpha}$、$i_{r\beta}$为两相静止坐标系上两相转子绕组电流；ω 为转子角速度；R_s、R_r 为定子、转子一相绕组电阻；L_s、L_r 为两相坐标系上定、转子绕组的自感；L_m 为两相坐标系上同轴定、转子绕组间的互感。

由式（7-3）的第 1、2 行，可得定子回路的电压方程为

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{\mathrm{d}i_{s\alpha}}{\mathrm{d}t} + L_m \frac{\mathrm{d}i_{r\alpha}}{\mathrm{d}t} \tag{7-4}$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{\mathrm{d}i_{s\beta}}{\mathrm{d}t} + L_m \frac{\mathrm{d}i_{r\beta}}{\mathrm{d}t} \tag{7-5}$$

在两相静止坐标系上，转子磁链在 α、β 轴上的分量为

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} \tag{7-6}$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} \tag{7-7}$$

因此

$$i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r}(\psi_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) \tag{7-8}$$

$$i_{r\beta} = \frac{1}{L_r}(\psi_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) \tag{7-9}$$

在两相静止坐标系电压方程即式（7-3）的第 3、4 行中，令 $u_{r\alpha} = u_{r\beta} = 0$，且将式（7-8）和式（7-9）的关系代入，经整理后，可得异步电动机转子磁链电流模型方程为

$$\psi_{r\alpha} = \frac{1}{T_r p + 1}(L_m i_{s\alpha} - \omega T_r \psi_{r\beta}) \tag{7-10}$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{1}{T_r p + 1}(L_m i_{s\beta} + \omega T_r \psi_{r\alpha}) \tag{7-11}$$

式中，$T_r = L_m / R_r$，为转子电磁时间常数。

7.4.1.2 按转子磁链定向两相旋转坐标系上的转子磁链电流模型

按转子磁链定向两相旋转坐标系上的转子磁链电流模型是通过检测定子三相电流和转速 ω_r 计算转子磁链，三相定子电流经 3s/2r 变换得到定子电流的励磁分量 i_{sm}和转矩分量 i_{st}。并由异步电动机的矢量控制方程式

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{st} \psi_r \tag{7-12}$$

$$\omega_s = \frac{L_m i_{st}}{T_r \psi_r} \tag{7-13}$$

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sm} \tag{7-14}$$

通过矢量控制方程即式（7-13），可以计算电动机转差 ω_s 和定子频率 $\omega_1(\omega_1 = \omega_r + \omega_s)$。通过矢量控制方程即式（7-14）可以计算电动机转子磁链 ψ_r，计算流程如图 7-15 所示。

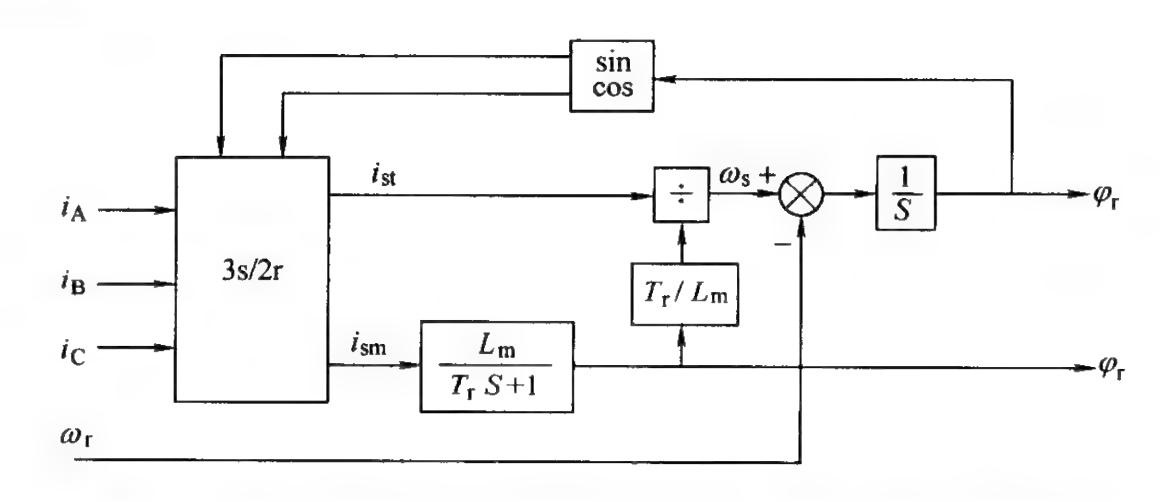


图 7-15　按转子磁链定向两相旋转坐标系上的转子磁链电流模型

7.4.2　转子磁链的电压模型

根据异步电动机在两相静止坐标系上的数学模型的定子电压方程即式（7-3）和转子电流方程即式（7-8）和式（7-9），可得转子磁链的电压方程即式（7-15），并构建转子磁链的电压模型，如图 7-16 所示。

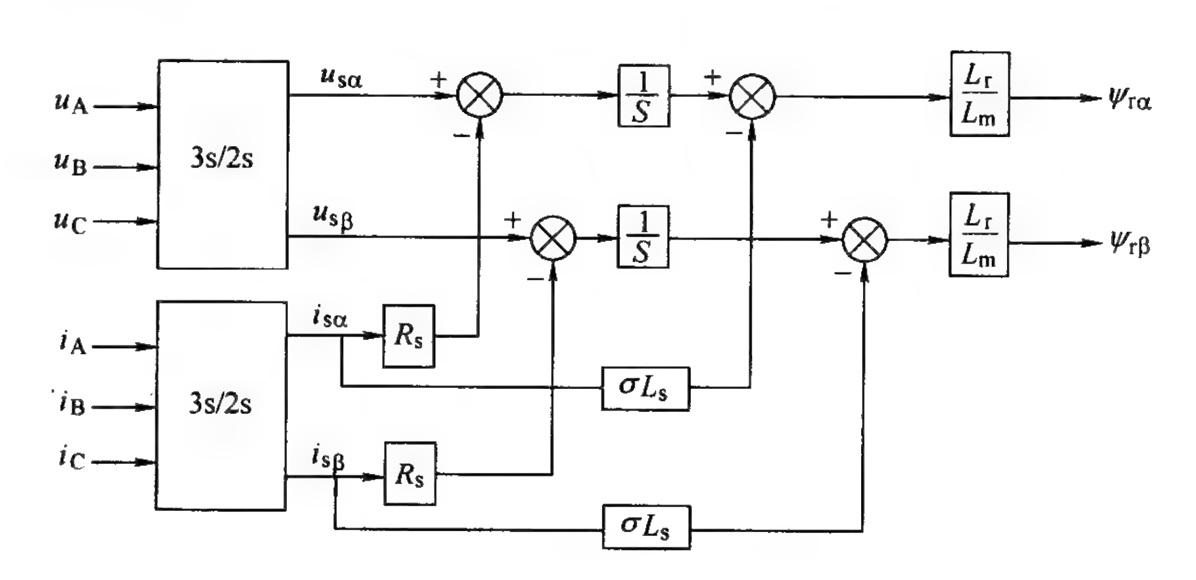


图 7-16　转子磁链的电压模型

$$\psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m}\left[\int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha})\mathrm{d}t - \sigma L_s i_{s\alpha}\right] \tag{7-15}$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m}\left[\int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta})\mathrm{d}t - \sigma L_s i_{s\beta}\right] \qquad (7\text{-}16)$$

式中，漏磁系数 $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$。

7.4.3 转子磁链模型的仿真

转子磁链的仿真模型如图 7-17 所示，模型中异步电动机（AC motor）由逆变器（interter）驱动，转子磁链的电流模型从电动机测量模块 M 得到定子三相电流（iabc）和转速（wr）信号，模型的输出是转子磁链 ψ_r（即图 7-17 中的 psir）。

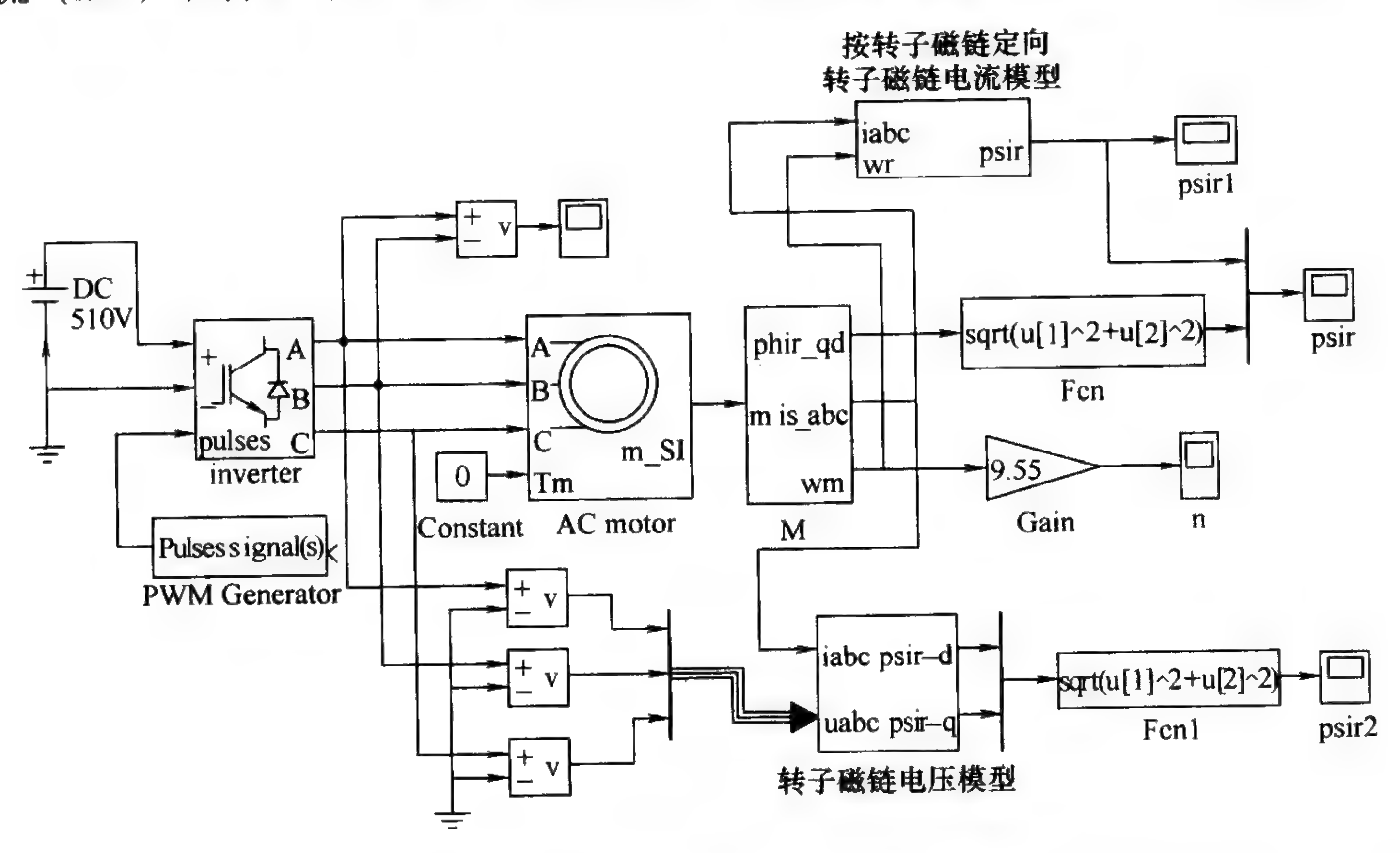


图 7-17 转子磁链的仿真模型

转子磁链的电压模型从电动机测量模块 M 得到定子三相电流（iabc），从电动机定子侧经电压测量单元取得三相电压信号（uabc），电压模型的输出是转子磁链在 α-β 轴上的分量 $\psi_{r\alpha}$、$\psi_{r\beta}$（psir-α、psir-β）。

电流模型使用在两相同步旋转坐标系上按转子磁链定向的磁链模型（见图 7-15），模型的结构如图 7-18 所示。电压模型的结构如图 7-19 所示，其中磁链在 α-β 坐标系上，电压模型的分支模块结构如图 7-20 所示。

【例 7-2】 转子磁链模型的计算参数设置如下：电动机 380V、50Hz 二对极，$R_s = 0.435\Omega$ $L_{ls} = 0.002\text{mH}$，$R_r = 0.816\Omega$，$L_{lr} = 0.002\text{mH}$，$L_m = 0.069\text{mH}$，$J = 0.19\text{kg·m}^2$。逆变器直流电源为 510V。定子绕组自感 $L_s = L_m + L_{ls} = 0.069 + 0.002 = 0.071\text{mH}$；转子绕组自感 $L_r = L_m + L_{lr} = 0.069 + 0.002 = 0.071\text{mH}$；漏磁系

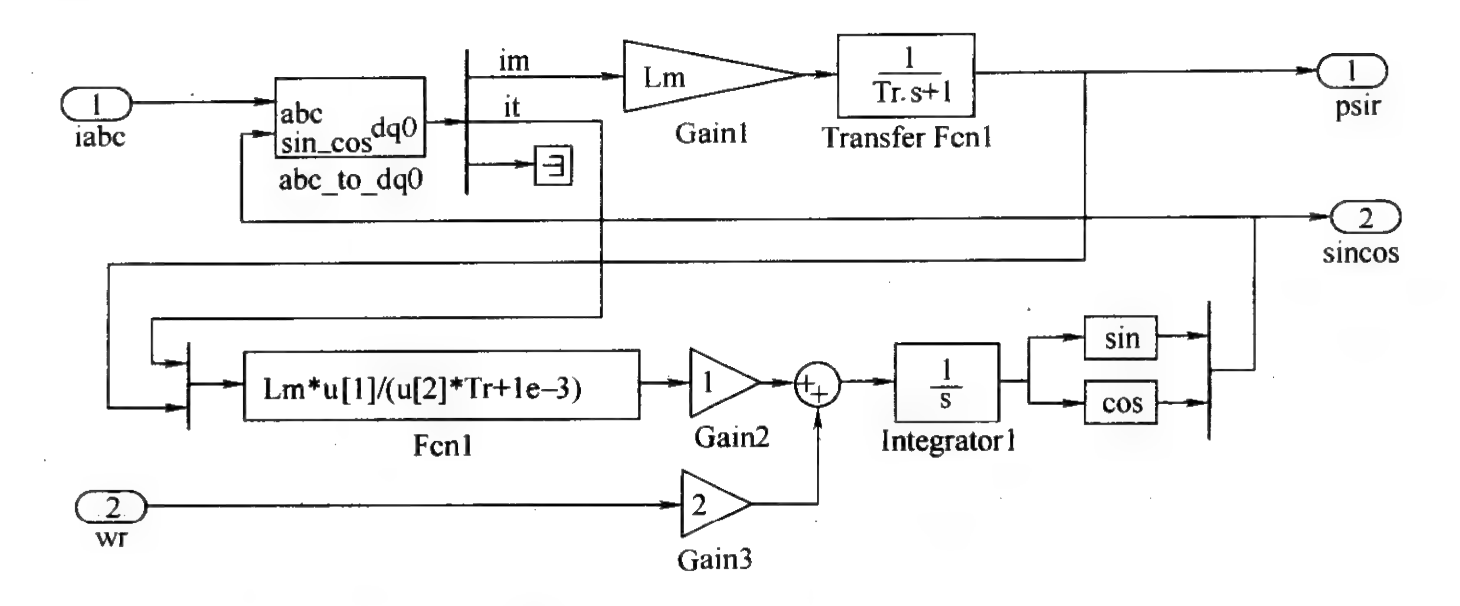


图 7-18　转子磁链电流模型结构（两相同步旋转坐标系）

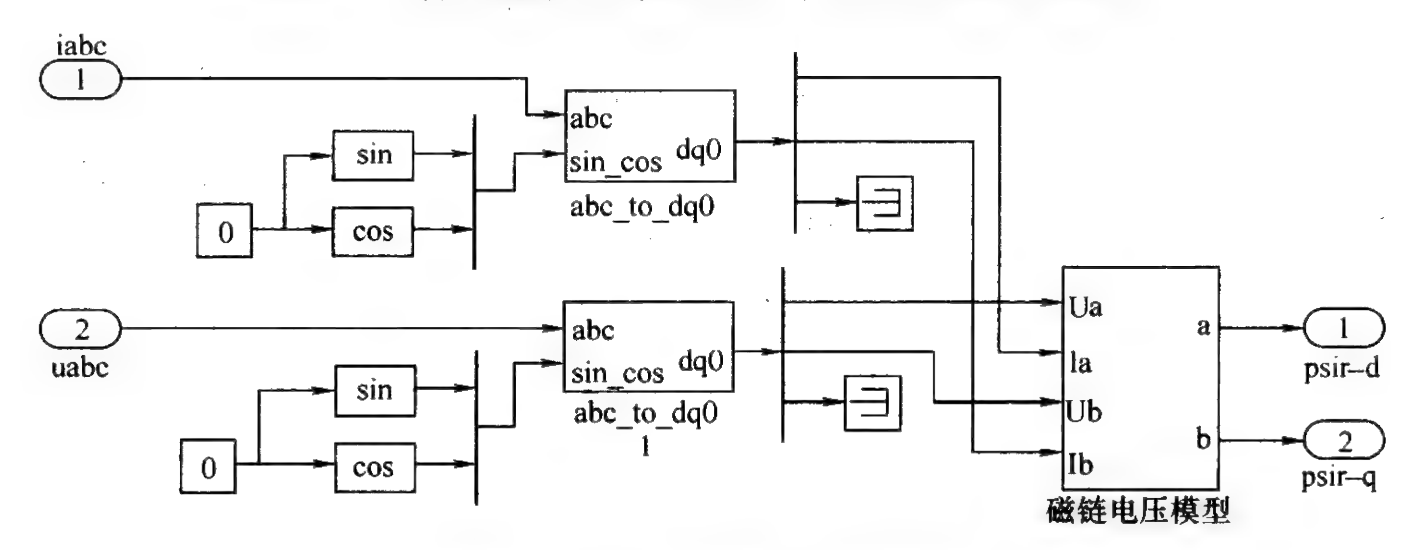


图 7-19　转子磁链电压模型结构

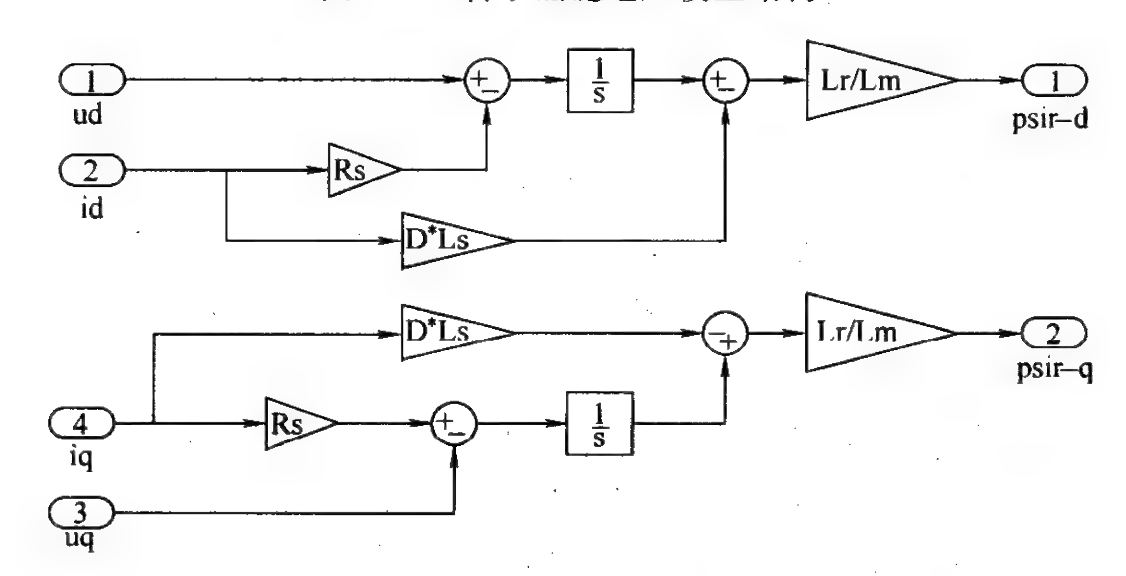


图 7-20　转子磁链电压模型分支模块结构

数 $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r = 0.056$；转子时间常数 $T_r = L_r / R_r = 0.071/0.816 = 0.087$。

将上述参数代入模型，可得仿真结果如图 7-21 所示。其中图 7-21a 和图 7-21b 所示为 PWM 发生器输出频率取 50Hz，调制度取 0.9 时的转子磁链波形；图 7-21c 和图 7-21d 所示为 PWM 发生器输出频率取 10Hz，调制度取 0.2 时的转子磁

链波形。波形表明，转子磁链的电流模型和电源模型计算得到结果是一致的，并且磁链模型的计算结果与电动机测量单元输出的转子磁链波形比较相差甚微（见图 7-21a）。实际上转子磁链的电压模型因为受定子电阻的影响较大［式（7-15）和式（7-16）］，比较起来电压模型更适合于中、高速范围内转子磁链的观测，低速时采用电流模型更适合。

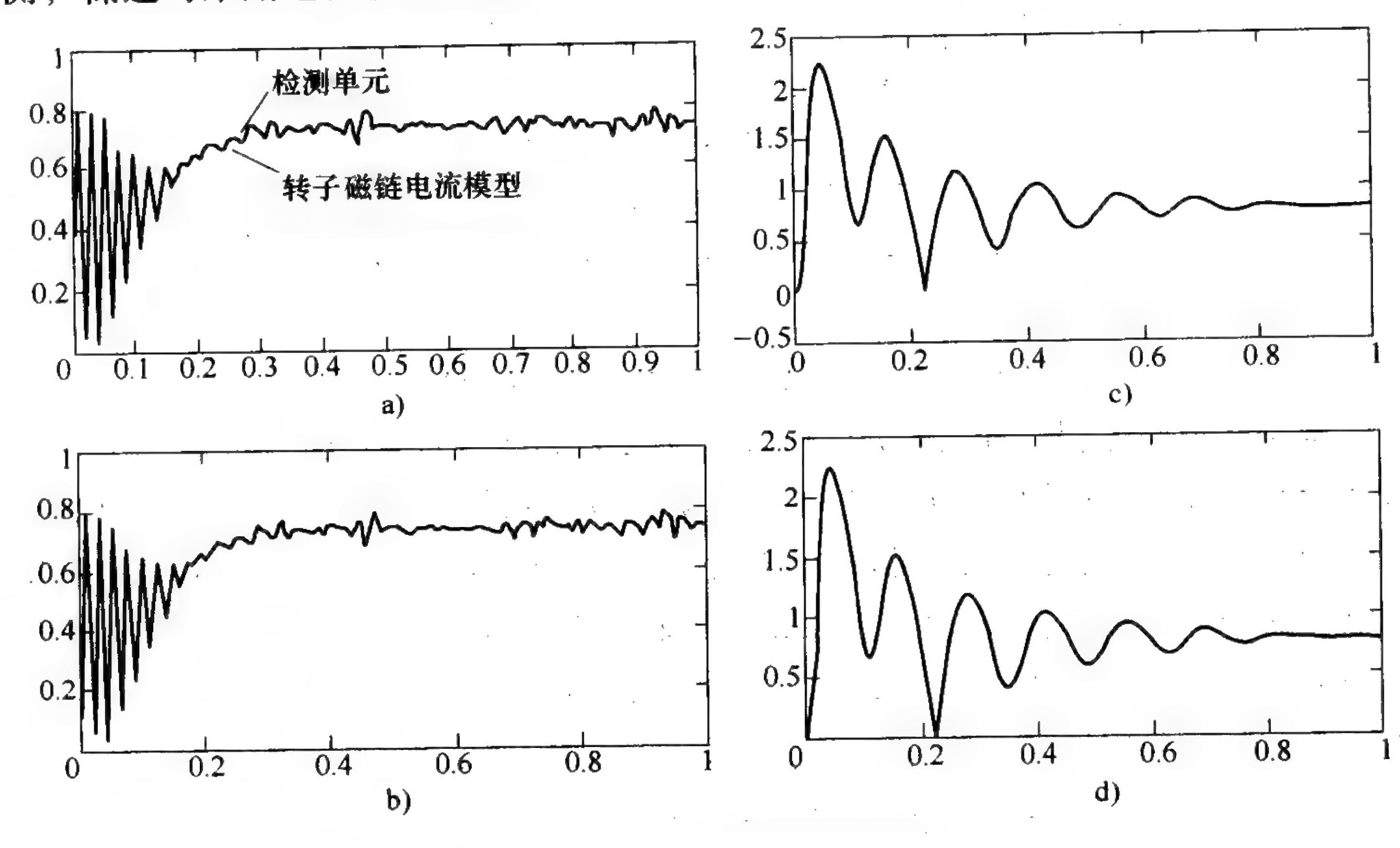


图 7-21　转子磁链观测结果

a）电流模型（50Hz、调制度为 0.9）　b）电压模型（50Hz、调制度为 0.9）

c）电流模型（10Hz、调制度为 0.2）　d）电压模型（10Hz、调制度为 0.2）

7.5　交流异步电动机矢量控制调速系统仿真

矢量控制是目前交流电动机的先进控制方式，一般将含有矢量变换的交流电动机控制都称之为矢量控制，实际上只有建立在等效直流机模型上，并按转子磁场准确定向的控制，电动机才能获得最优的动态性能。本节介绍几种异步电动机矢量控制调速系统控制方案的仿真。

7.5.1　转差频率控制的异步电动机矢量控制系统仿真

转差频率控制的异步电动机矢量控制调速系统的原理如图 7-22 所示。该系统主电路采用了 SPWM 电压型逆变器，这是通用变频器常用的方案。转速采取了转差频率控制，即异步电动机定子角频率 ω_1 由转子角频率 ω 和转差角频率 ω_s 组成（$\omega_1 = \omega + \omega_s$）。这样，在转速变化过程中，电动机的定子电流频率始终能

随转子的实际转速同步升降，使转速的调节更为平滑。

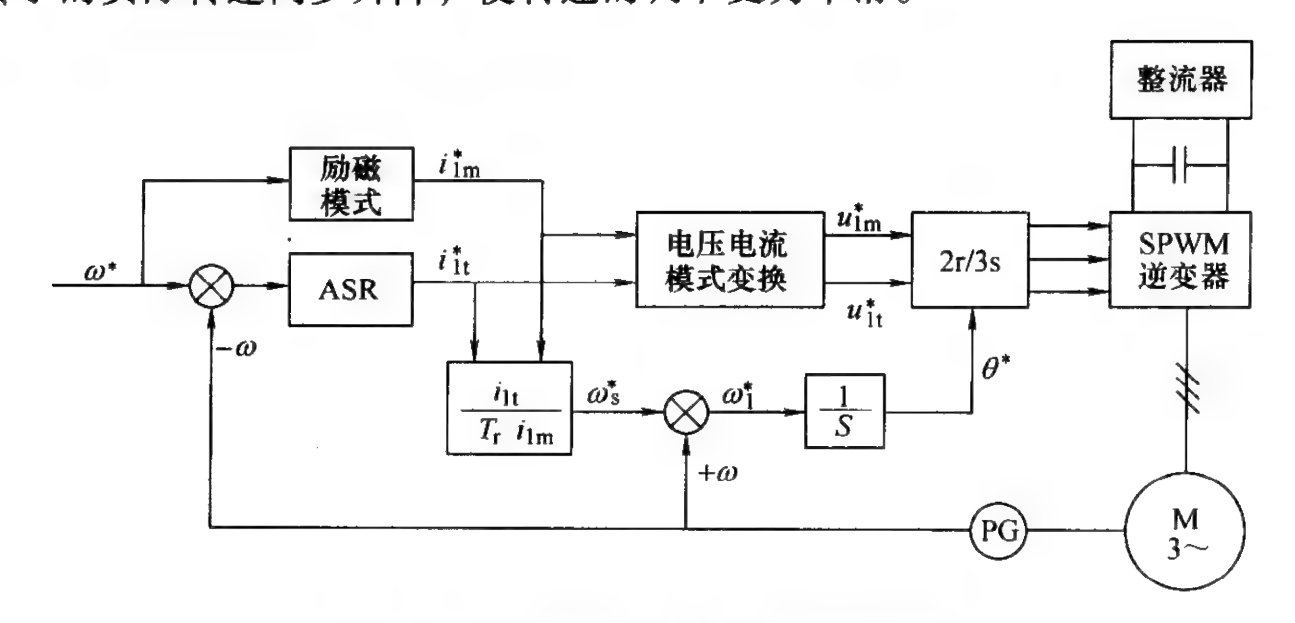


图 7-22　转差频率矢量控制系统原理图

从矢量控制方程，即式（7-12）、式（7-13）和式（7-14）中可以看到，在保持转子磁链 ψ_r 不变的控制下，电动机转矩直接受定子电流的转矩分量 i_{1t} 控制，并且转差 ω_s 可以通过定子电流的转矩分量 i_{1t} 计算，转子磁链 ψ_r 也可以通过定子电流的励磁分量 i_{1m} 来计算。在系统中以转速调节器 ASR 的输出为定子电流的转矩分量 i_{1t}，并通过计算得到转差 ω_s。如果采取磁通不变的控制，则 $p\psi_r = 0$，由式（7-14）可得 $\psi_r = L_m i_{1m}$，并由式（7-13）可得 $\omega_s = i_{1t}/T_r i_{1m}$。

由于矢量控制方程得到的是定子电流的励磁分量和转矩分量，而本系统采用了电压型逆变器，需要相应的将电流控制转换为电压控制，其变换关系为

$$u_{sm} = R_s i_{1m} - \omega_1 \sigma L_s i_{st} \tag{7-17}$$

$$u_{st} = \omega_1 L_s i_{sm} + (R_s + \sigma L_s p) i_{s1t} \tag{7-18}$$

式中，u_{sm}、u_{st}为定子电压的励磁分量和转矩分量，σ 为漏磁系数（$\sigma = 1 - L_m / L_s L_r$）。

u_{sm}、u_{st}经过两相旋转坐标系/三相静止坐标系的变换（2r/3s），得到 SPWM 逆变器的三相电压控制信号，并控制逆变器的输出电压。

上述系统的仿真模型如图 7-23 所示。

系统的控制部分由给定、PI 调节器、函数运算、两相/三相坐标变换、PWM 脉冲发生器等环节组成。其中，给定环节有定子电流励磁分量 i_m^* 和转子速度 n^*（见图 7-23）。放大器 G1、G2 和积分器组成了带限幅的转速调节器 ASR。电流电压模型转换由函数 um*、ut* 模块实现。函数运算模块 Ws 根据定子电流的励磁分量和转矩分量计算转差 ω_S，并与转子频率 ω 相加得到定子频率 ω_1，再经积分器得到定子电压矢量转角 θ（theta）。模块 sin、cos 、dq0_to_abc 实现了两相旋转坐标系至三相静止坐标系的变换。dq0_to_abc 的输出是 PWM 发生器的三

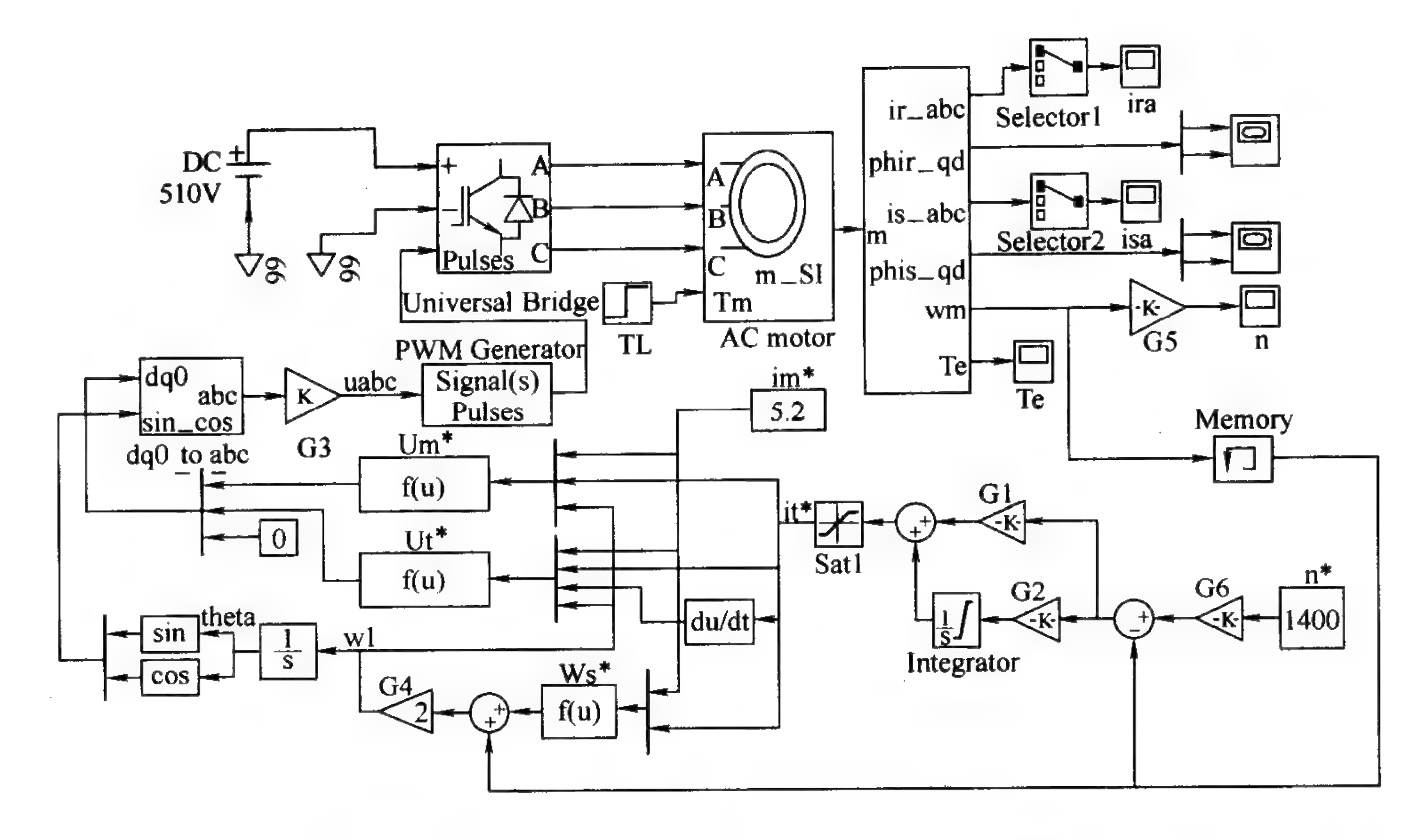


图 7-23　转差频率控制的矢量控制系统仿真模型

相调制信号，因为调制信号幅度不能大于 1，在 dq0_to_abc 输出后插入了衰减环节 G4。在模型调试时，可以先在此处断开，使系统工作在开环状态，将 PWM 发生器设置为内部模式，然后运行模型，根据 dq0_to_abc 输出和 PWM 发生器的三相调制输入信号幅值小于 1 的要求，计算 G4 的衰减系数。

【例 7-3】　对图 7-23 所示的模型进行仿真，电动机参数与例 7-2 相同。电流/电压变换模块（um*、ut*）的函数关系见式（7-4）、式（7-5），转差计算模块（Ws*）的函数关系见式（7-17）和式（7-18），式中，有

$$L_s = L_m + L_{ls} = 0.069 + 0.002 = 0.071\text{mH}$$

$$L_r = L_m + L_{lr} = 0.069 + 0.002 = 0.071\text{mH}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{0.071\text{mH}}{0.816\text{mH}} = 0.087$$

各放大器的参数取值见表 7-3。

表 7-3　转差频率矢量控制仿真模型放大器参数

放大器	放大倍数	备注	放大器	放大倍数	备注
G1	35		G4	2	极对数
G2	0.15		G5、G6	9.55	
G3	0.0076				

仿真给定了转速为 1400r/min 时的空载起动的过程，在起动后 0.45s 时加载 $T_L = 65\text{N}\cdot\text{m}$。该系统是比较复杂的系统，收敛是仿真计算中经常出现的问题，经

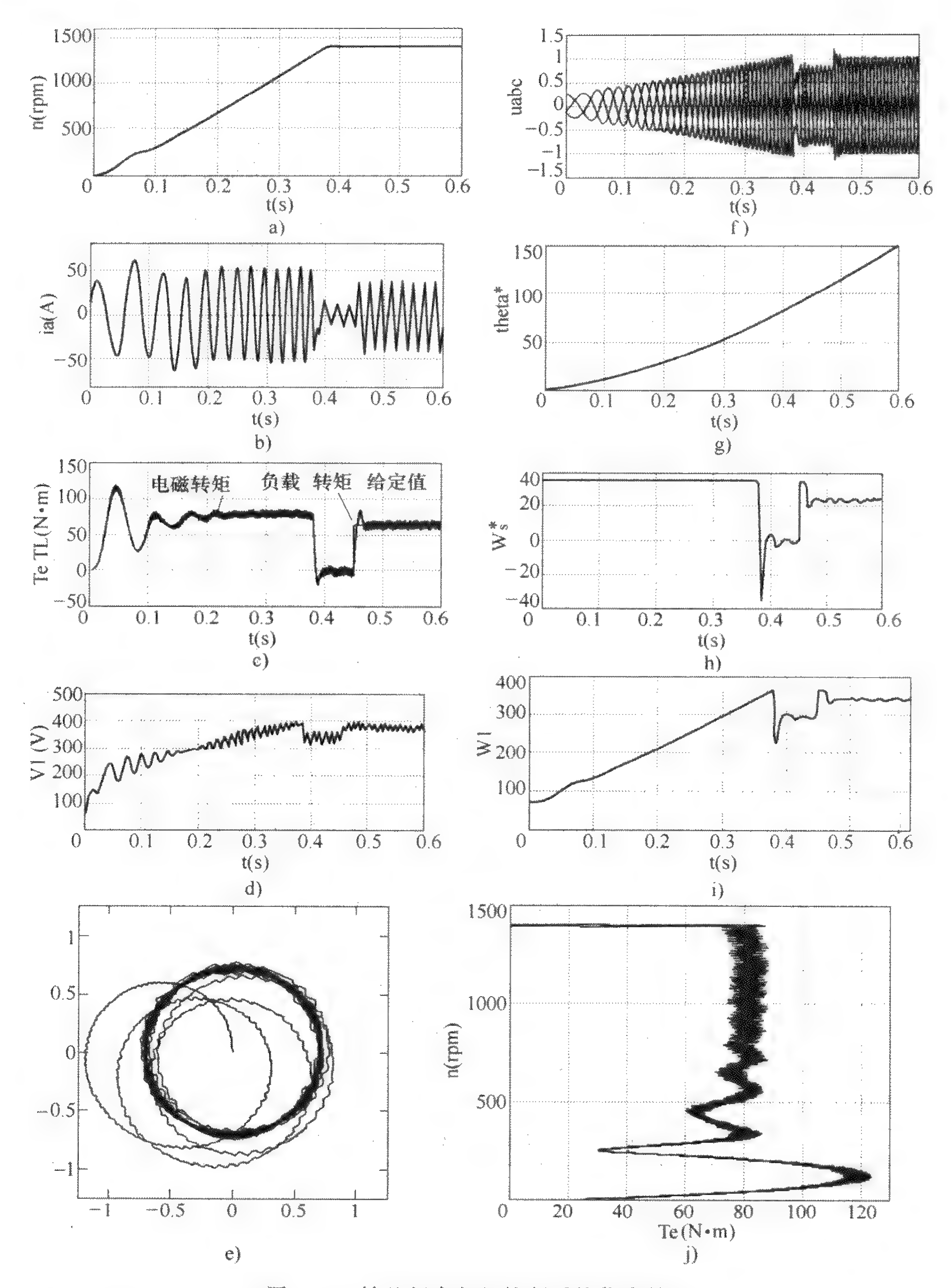


图 7-24 转差频率矢量控制系统仿真结果

a) 转速响应 b) 定子 A 相电流响应 c) 电动机电磁转矩和负载转矩给定 d) 电动机输入三相线电压有效值 e) 定子磁链轨迹 f) SPWM 的三相调制信号 g) 转子角度 h) 计算得到的转差频率给定 i) 逆变器调制频率 j) 转矩-转速特性

试用各种计算方法，选择了固定步长算法 ode5，步长取 10^{-5}。模型仿真的结果如图 7-24 所示。

在仿真结果中，图 7-24a ~ d 反映了在起动和加载过程中，电动机的转速、电流、电压和转矩的变化过程，在起动中逆变器输出电压（线电压）逐步提高，转速上升，但是电流基本保持不变 $I_s \approx 50\text{A}/\sqrt{2} = 35\text{A}$，电动机以给定的最大电流起动。在 0.75s 时，转速稍有超调后稳定在 1400r/min，电流也下降为空载电流，逆变器输出电压也减小了。电动机在加载后，电流和电压迅速上升，电动机转矩也随之增加，转速在略经调整后恢复不变。图 7-24f ~ i 反映了各控制模块输出信号波形的变化，经 2r/3s 变换后的三相调制信号的幅值和频率在调节过程是逐步增加的，随频率的增加转速逐步提高，信号幅值的提高，保证了电动机电流在起动过程中保持不变。图 7-24e 和 j 分别反映了电动机在起动过程中定子绕组产生的旋转磁场和电动机的转矩—转速特性，电动机在零状态起动时，电动机磁场有一个建立过程，在建立过程中磁场变化是不规则的，这也引起了转矩的大幅度变化，在 0.2s 后磁场呈规则的圆形。改变励磁的给定值 i_m^*，圆形旋转磁场的半径也有变化。电动机的转矩—转速特性反映了通过矢量控制使电动机保持了恒转矩起动，并且改变 ASR 的输出限幅 i_t^*，最大转矩可以调节。为了减少仿真需要的时间，仿真中减小了电动机的转动惯量，但是过小的转动惯量，容易使系统发生振荡，读者可以通过调节参数观察参数变化对系统的影响。仿真的结果表明采用转差频率控制的矢量控制系统具有良好的控制性能。

7.5.2 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真

带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统的电气原理如图 7-25 所示。在图 7-25 中，主电路采用了电流滞环控制型逆变器（参见本书相关部分内容）。在控制电路中，在转速环后增加了转矩控制内环，转速调节器 ASR 的输出是转矩调节器 ATR 的给定 T_e^*，而转矩的反馈信号 T_e，则通过矢量控制方程即式（7-12）计算得到。电路中的磁链调节器 ApsiR 用于对电动机定子磁链的控制，并设置了电流变换和磁链观测环节。ATR 和 ApsiR 的输出分别是定子电流的转矩分量 i_{st}^* 和励磁分量 i_{sm}^*。i_{st}^* 和 i_{sm}^* 经过 2r/3s 变换后得到三相定子电流的给定值 i_{sA}^*、i_{sB}^*、i_{sC}^*，并通过电流滞环控制 PWM 逆变器控制电动机定子的三相电流。

带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真模型如图 7-26 所示。其中直流电源 DC、逆变器 inverter、电动机 AC motor 和电动机测量模块组成了模型的主电路，逆变器的驱动信号由滞环脉冲发生器模块产生。三个调节器 ASR、ATR 和 ApsiR 均是带输出限幅的 PI 调节器（见图 7-27）。转子磁链观测使用两相同步

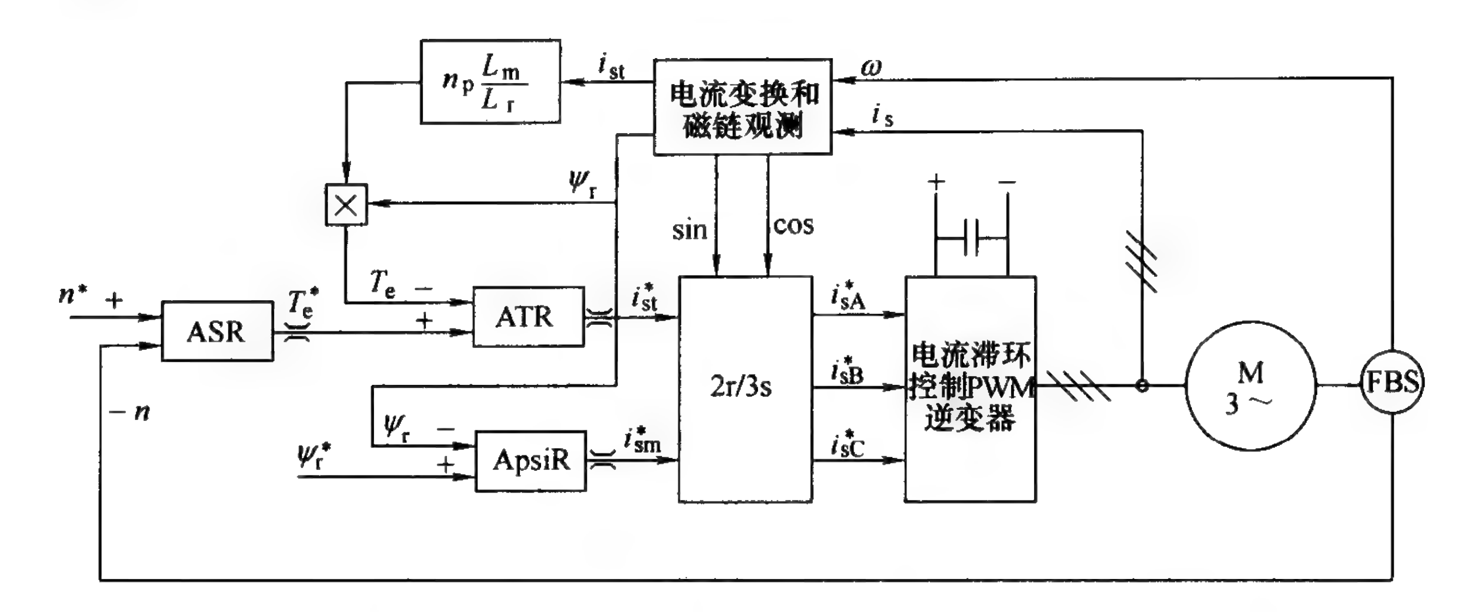


图 7-25 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统电气原理图

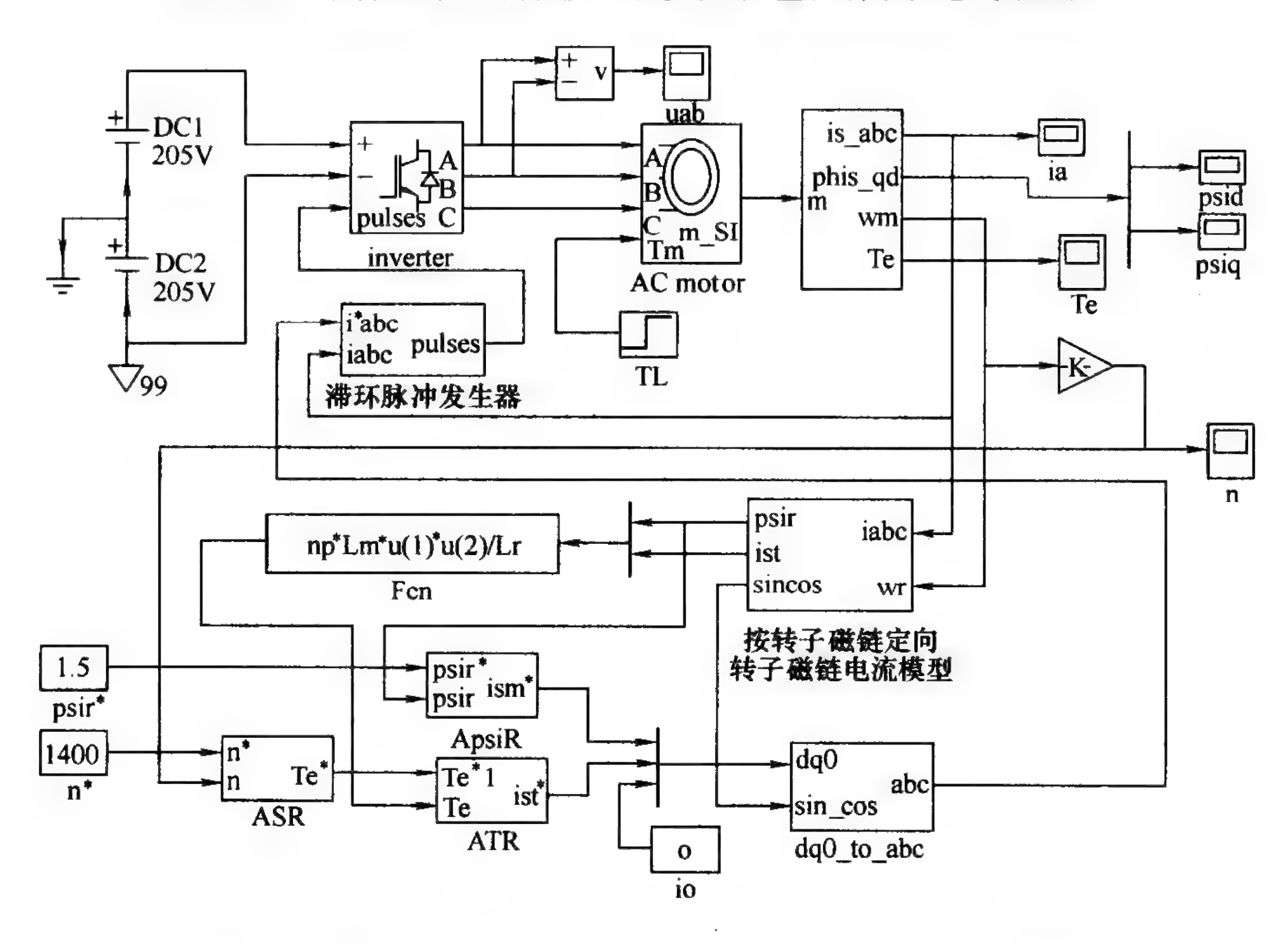


图 7-26 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真模型

旋转坐标系上的磁链模型，函数模块 Fcn 用于计算转矩，dq0_to_abc 模块用于 2r/3s 的坐标变换。

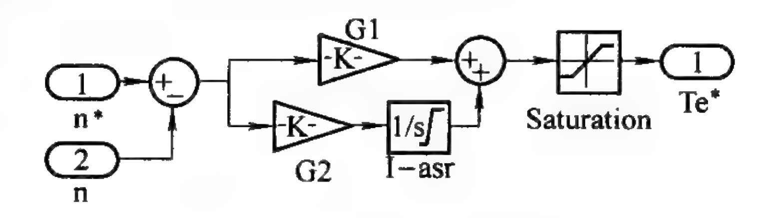


图 7-27 PI 调节器结构

【例 7-4】 仿真图 7-26 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统，电动机参数与例 7-2 相同。调节器参数见表 7-4。模型的仿真算法采用 Ode23tb。

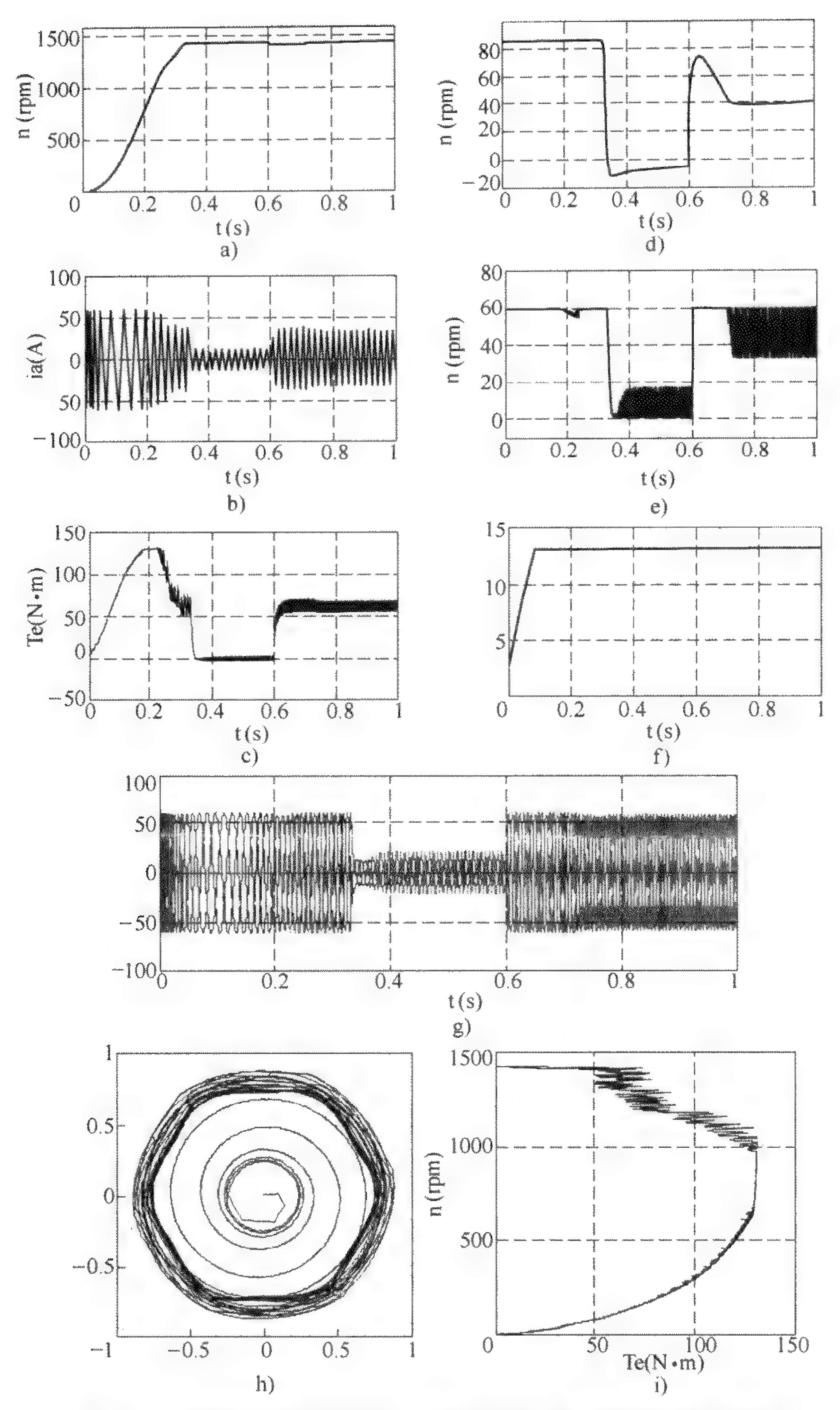


图 7-28　带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真结果

a）转速响应　b）A 相电流波形　c）输出转矩　d）转速调节器输出

e）转矩调节器输出　f）磁链调节器输出　g）经 2r/3s 变换的三相

电流给定波形　h）定子磁链轨迹　i）转矩-转速曲线

表 7-4　调节器参数参考值

调节器	比例放大器 G1 放大倍数	积分放大器 G2 放大倍数	积分器限幅		调节器输出限幅	
			上限	下限	上限	下限
转速调节器 ASR	3.8	0.8	80	-80	75	-75
转矩调节器 ATR	4.5	12	60	-60	60	-60
磁链调节器 ApsiR	1.8	100	15	-15	13	-13

在给定转速为 1400r/min，空载起动，在 0.6s 时加载 60N·m，系统的仿真结果如图 7-28 所示。其中图 7-28a ~ 图 7-28c 所示分别为电动机转速、电流、转矩的曲线，图 7-28d ~ 7-28f 所示分别为三个调节器的输出信号波形。在波形中可以看到，在矢量控制下转速上升平稳，加载后略有下降但随即恢复，在 0.35s 达到给定转速时和 0.6s 加载时，系统调节器和电流、转矩都有相应的响应。由于 ATR 和 ApsiR 都是带限幅的 PI 调节器，在起动中两个调节器都处于饱和限幅状态，因此定子电流的转矩和励磁分量都保持不变，定子电流的给定值也不变（见图 7-28g），所以在起动过程中定子电流基本保持不变（见图 7-28b），实现了恒流起动。

比较图 7-28h 和图 7-24e 中的磁链轨迹，带磁链调节器后，在起动阶段，磁场的建立过程比较平滑，磁链呈螺旋形增加，同时电动机转矩也不断上升；而不带磁链调节器（见图 7-24e）时，起动初期磁链轨迹波动较大，也引起了转矩的大幅度波动（见图 7-24c）。从转矩—转速曲线也可以看到，带磁链调节器的系统起动转矩较大。

7.5.3　无速度传感器的矢量控制系统仿真

在矢量控制系统中，为了实现转速的闭环控制和磁场定向，电动机的转速检测是必不可少的，并且转速检测的精度直接影响磁场的定向的准确性。从电动机数学模型可以看出，电动机的转速实际上也可以通过推算得到，因此，无速度传感器的矢量控制系统成为交流调速的重要研究内容。无速度传感器的交流调速一方面减少了设备，另一方面也避免了速度传感器检测本身可能带来的误差。无速度传感器的速度推算基本上都是在检测电动机电压、电流的基础上，通过电动机数学模型和矢量控制方程来推算电动机的转速，它的方法很多，这里仅举例介绍模型参考自适应的速度推算（MRAS），并通过仿真观察速度推算的效果。

采用模型参考自适应的速度推算（MRAS）是利用转子磁链的电压方程和电流方程分别计算转子磁链，由于电压模型不含角速度 ω 项，而电流模型包含 ω 项。故用电压模型的输出作为转子磁链的期望值，电流模型的输出作为转子磁链的推算值，计算电动机转速 ω_r，其关系为

$$\omega_r = \left(K_p + \frac{K_i}{S}\right)(\hat{\psi}_{\alpha r}\psi_{\beta r}^* - \hat{\psi}_{\beta r}\psi_{\alpha r}^*) \tag{7-19}$$

式中，$\psi_{\alpha r}^*$、$\psi_{\beta r}^*$ 为按电压方程计算的转子磁链，$\hat{\psi}_{\alpha r}$、$\hat{\psi}_{\beta r}$ 为按电流方程计算的转子磁链。

【例 7-5】 在带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真模型中，以推算转速 ω_r 代替电动机测量模块的转速值，观察无速度传感器的矢量控制系统的控制效果，仿真的模型如图 7-29 所示。

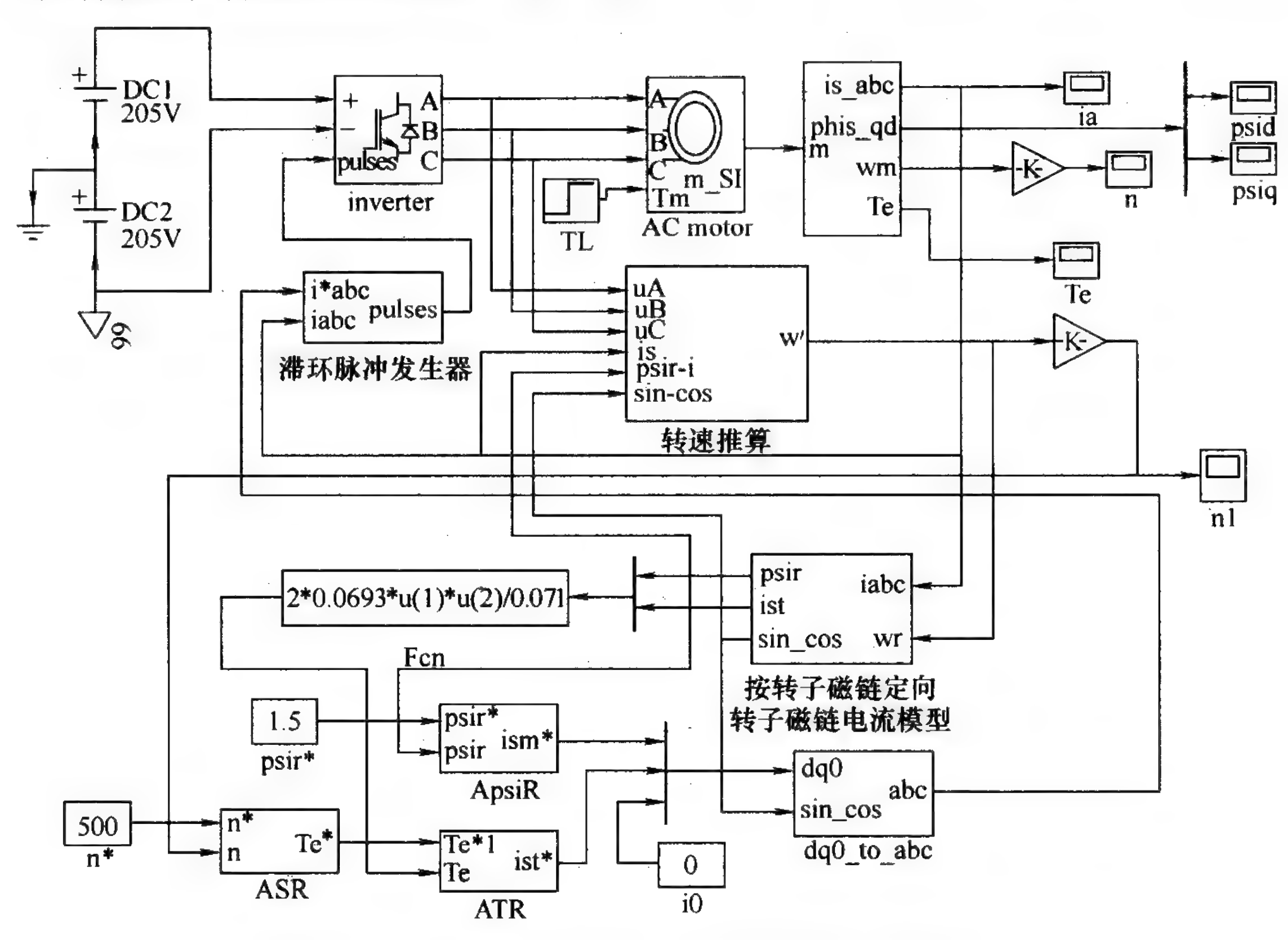


图 7-29　无速度传感器的矢量控制系统仿真模型

模型中转速推算模块的组成如图 7-30 所示。推算模块的 1～4 输入端，分别接入电动机定子三相电压和电流，经过 3s/2s 坐标变换，再由磁链电压模型计算得到 $\psi_{\alpha r}^*$、$\psi_{\beta r}^*$；推算模块利用了矢量控制模型中转子磁链电流模型输出的磁链信号 psir 和 sin_cos，经直角坐标变换得到转子磁链在 α-β 轴上的分量 $\hat{\psi}_{\alpha r}$、$\hat{\psi}_{\beta r}$，然后按式（7-19）计算得到电动机转速。模型的参数与例 7-4 相同。转速推算模块中 PI 调节器的参数取 $K_p = 4500$（G1）、$K_i = 1.98$（G2）。

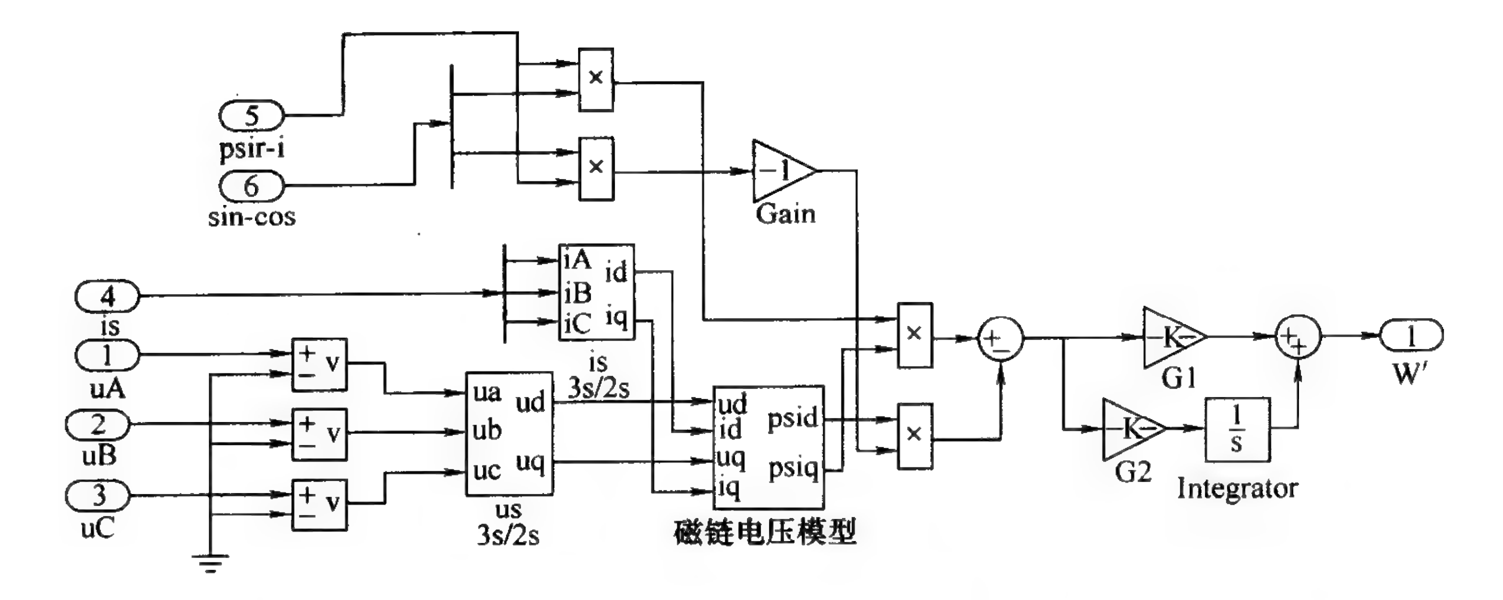


图 7-30 转速推算模块组成

图 7-31 所示为推算得到的转速与电动机测量模块输出的转速的比较，图中带有小幅波动的是推算转速，较平滑的是测量模块输出的转速，两者差异很小。图 7-32 所示为以推算得到的转速作为转速反馈和以电动机测量模块输出的转速

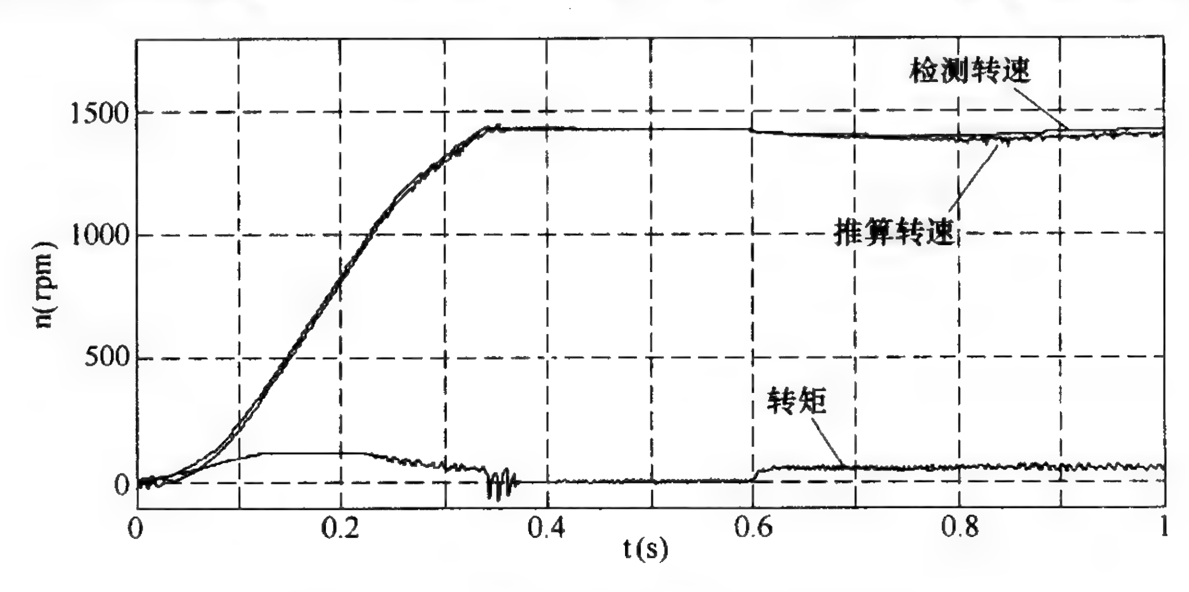


图 7-31 推算转速与测量转速的比较

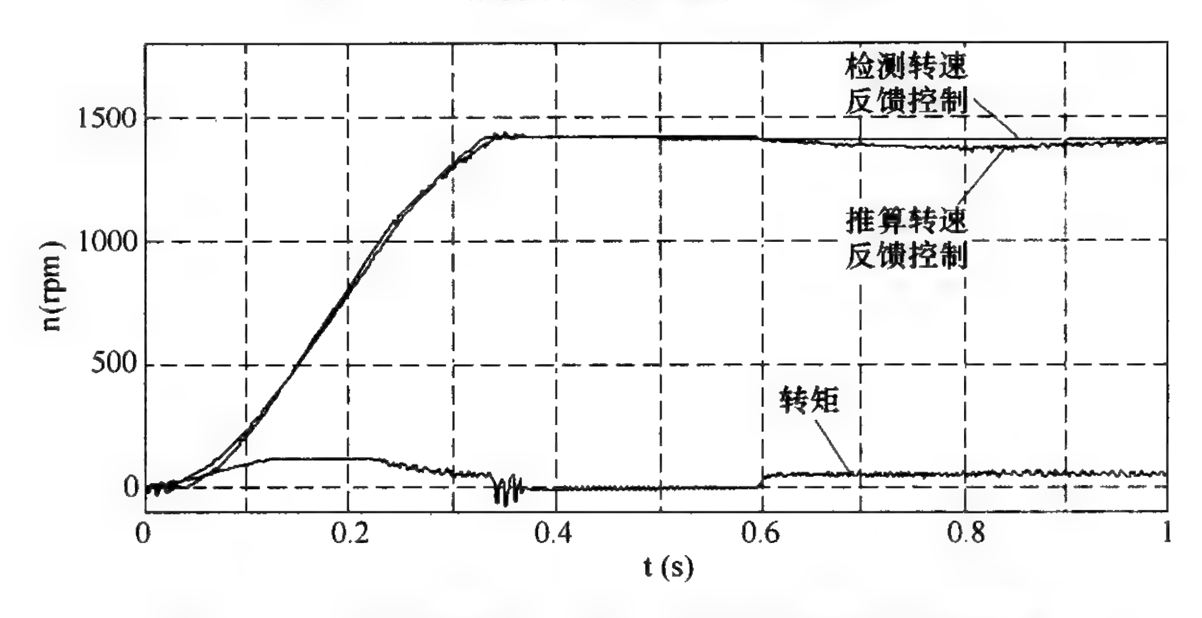


图 7-32 无速度传感器和有速度传感器矢量控制系统比较

作为转速反馈信号时控制效果的比较，推算速度矢量控制可以取得几乎相同的控制效果，只是电动机加载后的恢复时间较长，这与 K_i 的取值有关，较大的 K_i 恢复时间较短，但是推算转速的波动加大，PI 调节器的 K_p 和 K_i 两个参数选择是很关键的，需要多次试凑修正，而使用仿真是较方便的，这是仿真的优点。

图 7-33 所示为无转速检测矢量控制系统的转速和转矩响应。其中图 7-33b 所示为转矩响应曲线，从图中可以看到，0～0.15s 是电动机的反向起动过程。在起动过程中，通过转速观测器计算的转速与电动机测量模块检测的转速有偏差（见图 7-33a），从 0.15～0.2s 为反转稳定运行阶段，在 0.2s 时系统给定从反转 500r/min 切换到正转 500r/min，电动机转速开始下降，在 0.31s 左右，电动机从反转进入正转的起动阶段，在这阶段中电动机始终保持最大转矩，直到正转起动完毕，并且在这一过程中，观测转速与检测转速几乎没有差别。

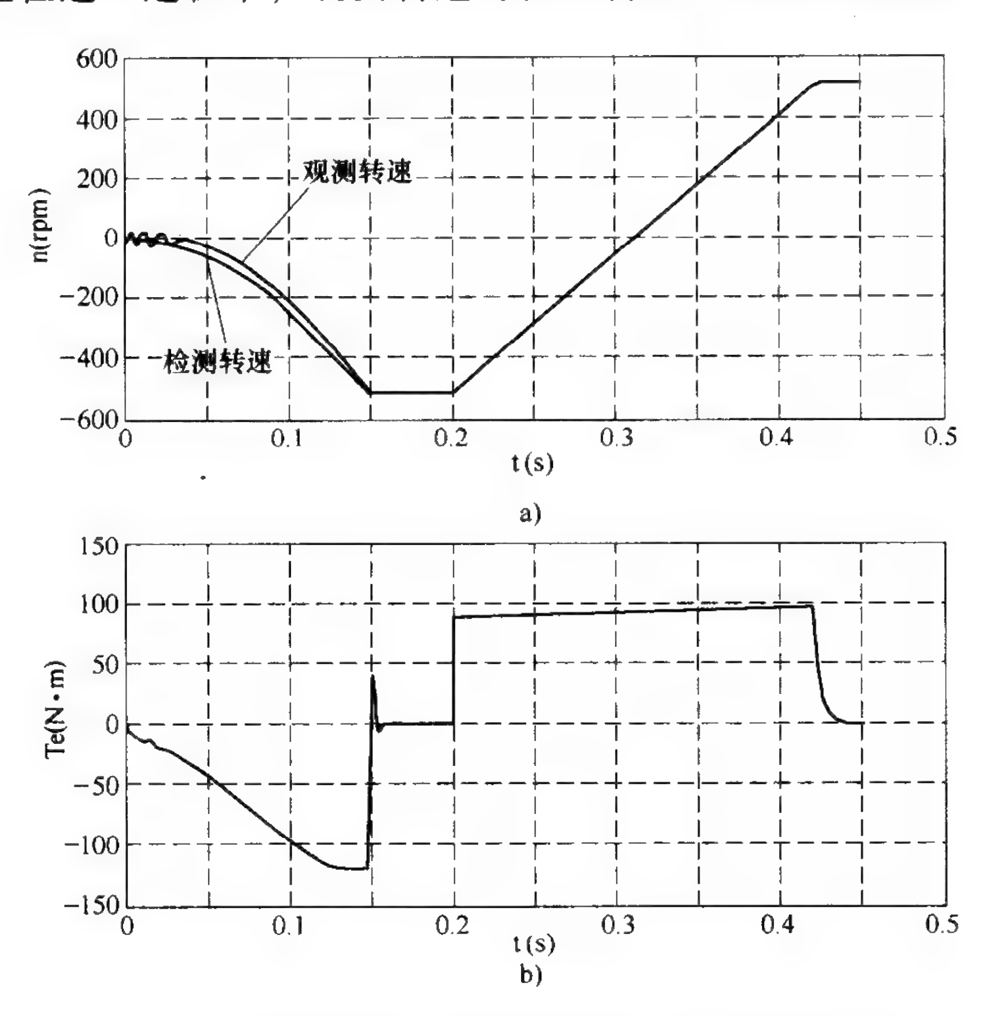


图 7-33 无转速检测矢量控制系统正反转调节过程

a）反转到正转过程中观测转速与检测转速的比较

b）反转到正转的转矩响应

第8章　提高功率因数的电力变流电路仿真

8.1　谐波污染与电能质量管理

随着电子与电气产品的开关化、高频化与集成化趋势的发展，电磁兼容(EMC)（又称环境电磁学）问题日益突出，已经成为目前学术界和工程界的一个热门研究方向。电磁兼容包括两层含义：①电磁干扰（EMI）；②电磁敏感度(EMS)。其中，EMI就包括连续骚扰电压、断续骚扰电压、骚扰功率和谐波电流等项指标。

电力谐波的产生大致有以下几个来源：①发电环节；②输电环节；③用电环节；④电力电子变流设备，如各种电力变流设备（整流器、逆变器）、相控调速和调压装置以及大容量的电力晶闸管可控开关设备。这些电力设备广泛地用于各行各业，量大面广，造成了比较严重的低次谐波、高次谐波、次谐波和间谐波电流问题。

电力谐波的直接后果是，迫使电网电压出现畸变，电网负载额外增加，供电能力下降，损耗加剧，故障率提高，损耗加重，而且还对其他电气设备造成影响，具体表现在以下几个方面：①对发配电和用电设备的影响；②对旋转电机的影响；③对电力变压器的影响；④对输电线路的影响；⑤对电力电容器的影响；⑥对继电保护和自动装置工作和可靠性的影响；⑦对测量和计量仪器的影响；⑧对通信系统的影响；⑨对用电设备工作质量的影响等等。

谐波问题不仅关系到供电系统的供电质量和供电安全，而且还关系到广大电力用户和电气设备制造厂的切身利益。为减少供电系统的谐波问题，应该从管理上和技术上采取对策。1998年12月14日，我国发布了国家标准GB17625.1—1998《低压电气及电子设备发出的谐波电流限值（设备每相输入电流≤16A)》，其在技术内容上与国际标准一致，等效于IEC61000—3—2：1995。GB17625.1—1998规定了准备接入公用低压配电系统中的电气、电子设备（每相输入电流≤16A）可能产生谐波的限值。只有经过试验证实符合该标准限值要求的设备才能接入配电系统中。这样，就可以对低压电气及电子产品注入供电系统的总体谐波电流水平加以限制。

该标准对以下四类设备规定了谐波电流的发射限值。A类设备是指平衡的三相设备以及除B、C和D类外的所有其他设备。B类设备是指便携式电动工具。

C类设备是指包括调光的照明设备。D类设备是指PC和周边设备，Audio设备，输入电流具有标准所定义的“特殊波形”，且其有功功率不大于600W的设备。该标准还规定了试验电路和对试验电源的要求、对测量设备的要求和试验条件等内容。其中A类用电设备的谐波电流限值见表8-1，B类用电设备的限值为A类的1.5倍。

表8-1 A类用电设备谐波电流限值

谐波电流次数 h		限值/A
奇次谐波	3	2.30
	5	1.14
	7	0.77
	9	0.40
	11	0.33
	13	0.21
	$15 \leqslant h \leqslant 39$	$0.15 \times 15/h$
偶次谐波	2	1.08
	4	0.43
	6	0.30
	$8 \leqslant h \leqslant 40$	$0.23 \times 8/h$

鉴于家电领域电力污染的严重性以及适应加入WTO后的出口需要，2001年12月7日，国家认证认可监督管理委员会适时地制定了《强制性产品认证管理规定》，这是我国在谐波治理法规方面又一重大举措。

消除电网谐波，过去较多地使用无源滤波器，它虽然具有结构简单、对谐波滤除效果明显等优点，但一般只适用于静态条件下工作，而且只能针对某些次谐波进行补偿。当电网阻抗及系统结构发生变化时，会严重影响其滤波性能，并可能引发过载、串并联谐振等不利现象。解决谐波问题的思路主要有两条：①集中补偿，设计无源电力滤波器或有源电力滤波器抑制或消除非线性功率装置产生的谐波污染；②就地补偿，使用高输入功率因数装置作为现有电力电子装置的前级电路，抑制或消除产生电力谐波的根源。

集中补偿是针对某一区域的电力负载产生的谐波电流和无功电流集中在电网接入端进行补偿，使得电网输入电流中不含谐波成分或无功成分。目前采用的方法有静止无功补偿器（Static Var Compensator，SVC）、静止无功发生器（Static Var Generator，SVG）和有源电力滤波器（Active Power Filter，APF）等。就地补偿一般采用高功率因数整流技术，或采取合适的有源、无源滤波技术，使其尽量不产生谐波电流，提高输入电流位移因数和波形系数，使输入功率因数接近于1。

从主动与被动方面看，滤波技术包括有源滤波和无源滤波。从接入方式来

看，滤波技术包括并联方式、串联方式和串并联方式。从输入相数来看，滤波技术包括单相滤波和三相滤波。从滤波是否完全来看，滤波技术包括完全滤波和部分滤波。

下面给出功率因数的定义。根据 IEEE 有关规定，功率因数为输入电流波形系数与基波输入电流相对输入电压位移因数的乘积，假设经过傅里叶级数分解之后，输入电流的各次谐波分量的有效值为 I_1、I_2、I_3…、I_n、…，其中 I_1 为基波电流的有效值，I_n 为 n（即表 8-1 中的 h）次谐波电流的有效值，n 为自然数，则谐波电流的含量为 $I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$，$I_H$ 即总的谐波电流含量，但是它并不能直观地反映电流中谐波电流含量的严重程度。为此，引入电流总谐波畸变率概念，即 $THD = I_H/I_1 \times 100\%$，输入电流的有效值为 $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2 + \cdots} = \sqrt{I_1^2 + I_H^2}$，则输入功率因数

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{UI_1\cos\varphi_i}{UI} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}\cos\varphi_i$$

式中，P 为有功功率（W）；S 为视在功率（VA），φ_i 为输入基波电流与输入电压的初相位差。

到目前为止，出现了很多种电力电子变流器的滤波技术，本章主要涉及几种采用不可控整流桥的单相和三相无源滤波（PFC）技术、单相和三相有源电力滤波（APFC）技术以及单相和三相有源电力滤波（APF）技术，在简要描述其工作原理的基础上，给出基于 SIMULINK 6.0 的仿真分析方法。

8.2 高功率因数的单相无源 AC-DC 变流器

直接利用单相交流电源供电的负载有阻性负载和感性负载，对于阻性负载，如热水器，其输入电流为正弦波形，功率因数为 1。对于感性负载，如单相压缩机，其输入电流波形正弦度很高，位移功率因数也较高。但是当压缩机的电动机出现磁饱和时，会产生偶次谐波电流分量。另一类单相负载为晶闸管相控调压的负载，如交流风机输入电流波形系数较低，而且会产生偶次谐波电流分量，可以通过改善触发延迟角和增加适当的输入滤波器来解决。

本节主要考虑一类单相交流电源输入、采用交直交两级变流结构的变频器的高输入功率因数设计问题。这类变频器的功率前级普遍采用不可控整流桥作为单相 AC-DC 变流器，要求直流回路电解电容的电容量要足够大，否则直流电压纹波过大，对电解电容寿命和变流器输出性能都将带来一定的负面影响。这样的结果，使得输入电流波形畸变严重，一般地，总电流谐波畸变率大于 1，功

率因数只有0.5左右，各次谐波含量几乎均超标，电源容量的利用率降低，因此有必要对单相AC-DC变流器环节采取提高功率因数的措施，即功率因数校正技术。对单相AC-DC变流器而言，功率因数校正技术包括无源PFC和有源PFC两种，从变流形式上，无源PFC电路也可以称为单相无源AC-DC变流器。

8.2.1 单相无源功率因数校正的电路型式

单相无源PFC电路型式多种多样，下面给出几种典型和效果较好的电路拓扑结构。其中，桥前桥后采用双电抗器的单相无源PFC电路如图8-1所示，桥前采用LC串联谐振环节的单相无源PFC电路如图8-2所示，桥前采用LC滤波器的单相无源PFC电路如图8-3所示，桥前采用LC滤波器、桥后采用电抗器的单相无源PFC电路如图8-4所示。采用谐振电抗器向输入线路注入谐波电流也可以实现单相无源PFC滤波，分别如图8-5～图8-8所示，这种方案校正效果良好，覆盖功率范围大，直流回路电压损失较低。

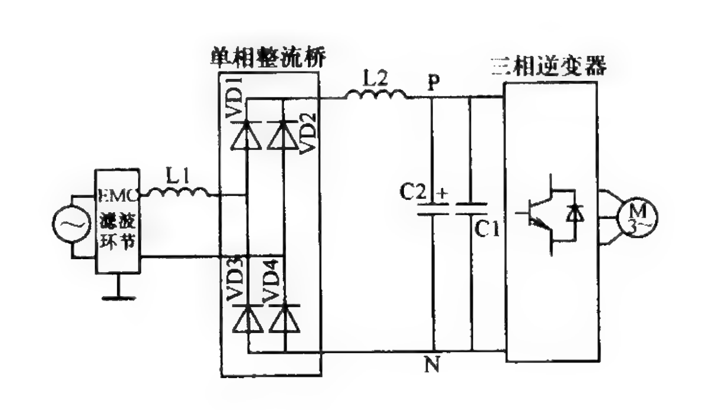


图8-1 桥前桥后采用双电抗器的单相无源PFC电路

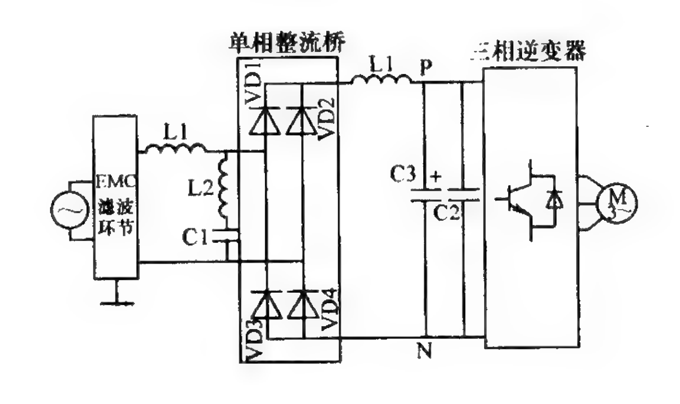


图8-2 桥前采用LC串联谐振环节的单相无源PFC电路

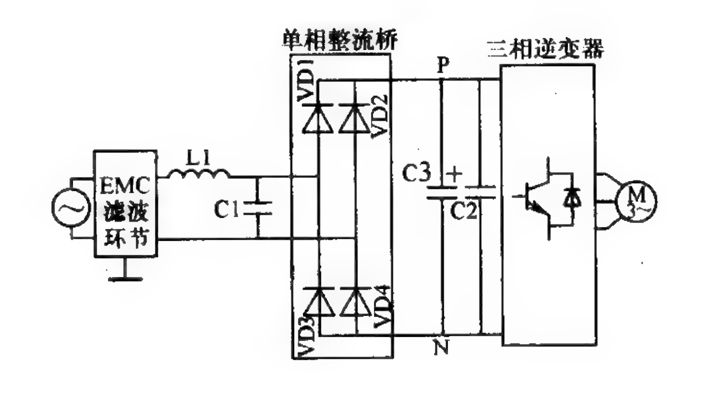


图8-3 桥前采用LC滤波器的单相无源PFC电路

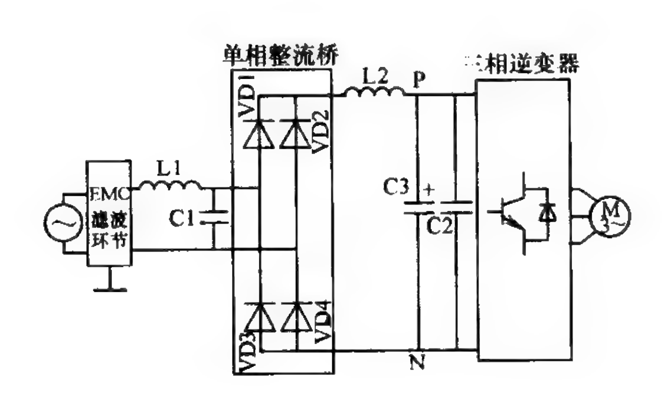


图8-4 桥前采用LC滤波器、桥后采用电抗器的单相无源PFC电路

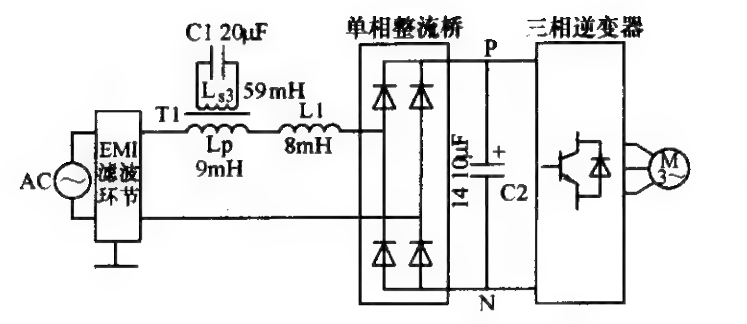


图 8-5 3 次谐振电抗器的谐波电流注入电路 1

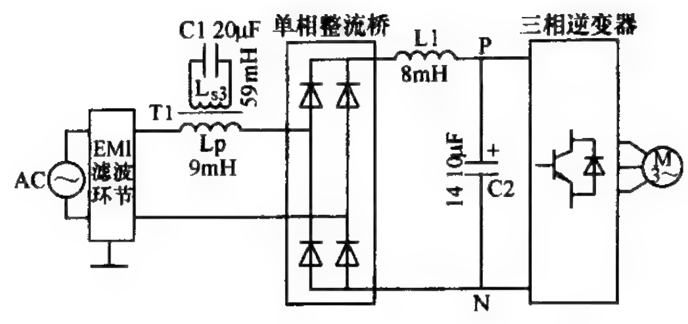


图 8-6 3 次谐振电抗器的谐波电流注入电路 2

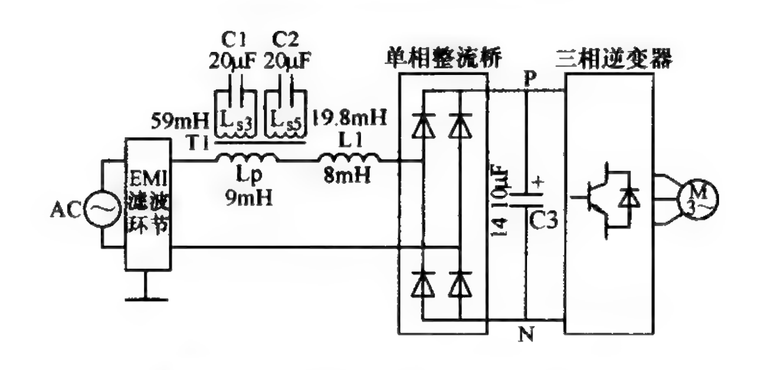


图 8-7 3 次与 5 次谐振电抗器的谐波电流注入电流

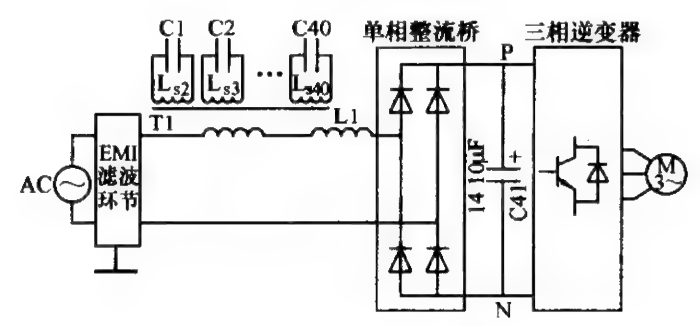


图 8-8 次谐振电抗器的谐波电流注入电流

8.2.2 谐振电抗器在单相无源 PFC 中的仿真分析

基于图 8-6 所示的基于谐振电抗器的单相无源 PFC 电路，采用 MATLAB 7.0 的 SIMULINK 6.0 建立如图 8-9 所示的仿真电路。其中解算选项为：变步长，最大步长为 1e－5s，相对精度为 1e-3，算法选择 ode23t（mod. Stiff/trapezoidal)，其他选项选择默认值。图 8-9 中的 VS1 为标准单相正弦电压源，有效值为 220V。UB1 为通用单相不控整流桥。MI1 为互感器，一边自感为 1.9mH，一次绕组电阻为 0.01Ω，二次绕组自感为 59mH，二次绕组电阻为 0.01Ω，励磁电阻为 0.5Ω，励磁电感为 10mH。RLC1 为谐振电路电容取值为 19.1μF，为便于收敛，串联电阻为 0.01Ω，谐振频率为 150Hz。RLC2 为普通电抗器，取值为 8mH。RLC3 为电解电容，取值为 1410μF。RLC4 为电阻负载，取值为 40Ω。上述参数的取值均来自于实际系统的参数。Mux1 为信号复合器，Fcn1、Fcn 2 为通用表达式，FFT 为快速傅里叶变换模块，THDM1 为总谐波畸变率测量模块，A/RPM1 为有功功率与无功功率表，VM1、VM2 为电压表，CM1 为电流表。左上角方框为频谱显示器，双击后可以显示输入电流的波形和频谱。其他均为常用功能模块，如常数模块 Constant1。图中表格为仿真获得的 0～19 次谐波电流的幅值，其中，基波电流幅值为 7.83A，3 次谐波电流的幅值为 1.35A，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2。

仿真结果如下：示波器 Scope1 中显示了输入电压与输入电流波形，如图 8-

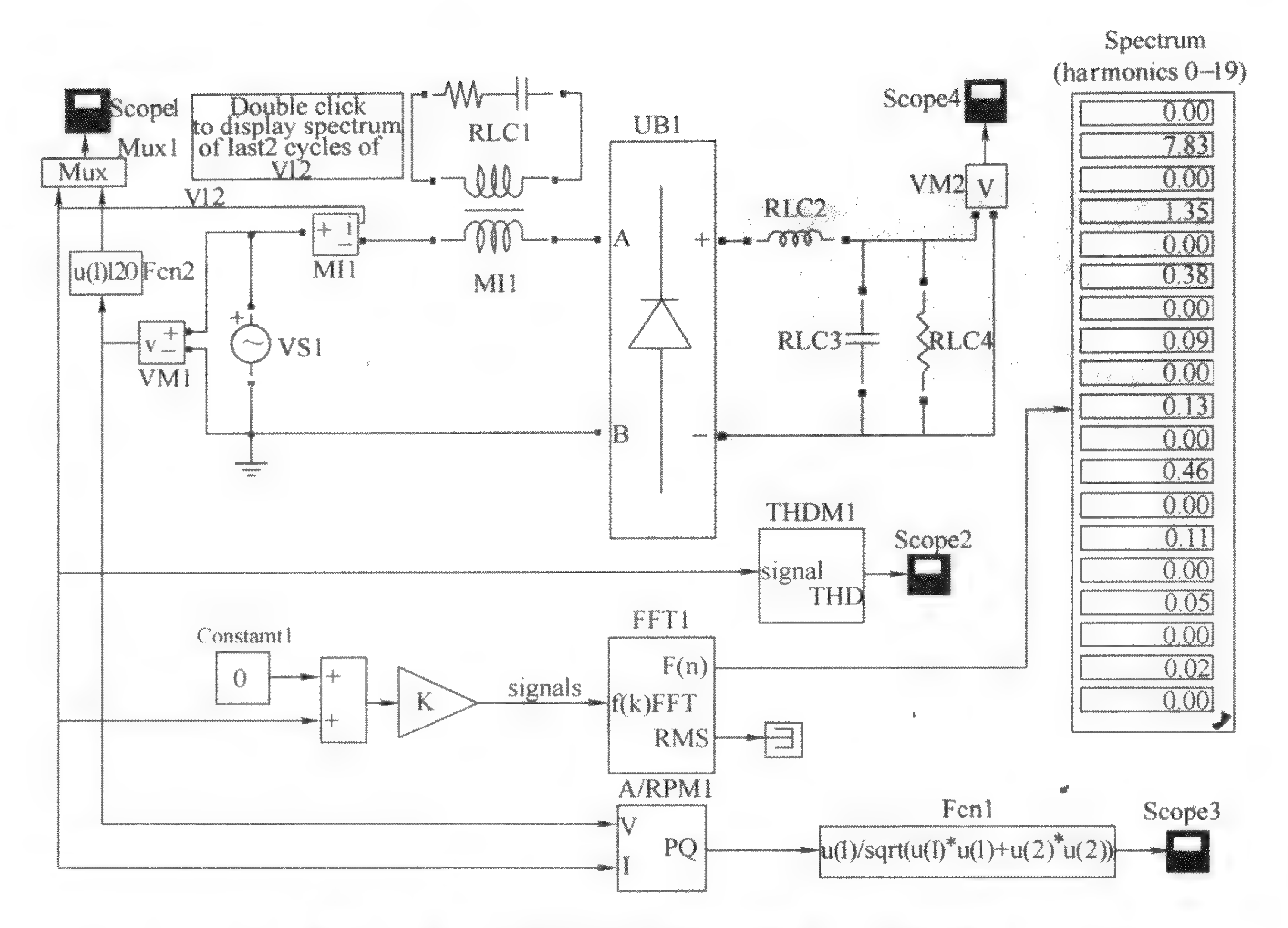


图 8-9　基于 3 次谐振电抗器的无源 PFC 仿真电路

10 所示，其中输入电压幅值缩减为 1/20，可见输入电流波形的正弦度较高，基波电流的位移角度约为 27°，位移因数为 0.891。示波器 Scope2 中显示了输入电路总谐波畸变率波形，如图 8-11 所示，THD 为 0.21。示波器 Scope3 中显示了输入功率因数波形，PF 为 0.75 左右，如图 8-12 所示。频谱显示器中显示了输入电流波形与频谱，如图 8-13 所示，与图 8-9 中表格的结果相近。输出直流电压的平均值为 236V，纹波电压的最大峰峰值为 10V。

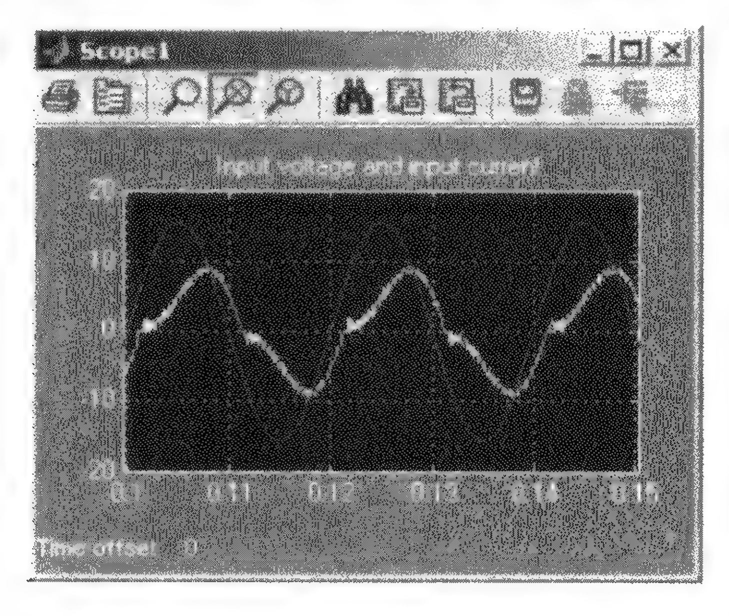


图 8-10　输入电压与输入电流波形

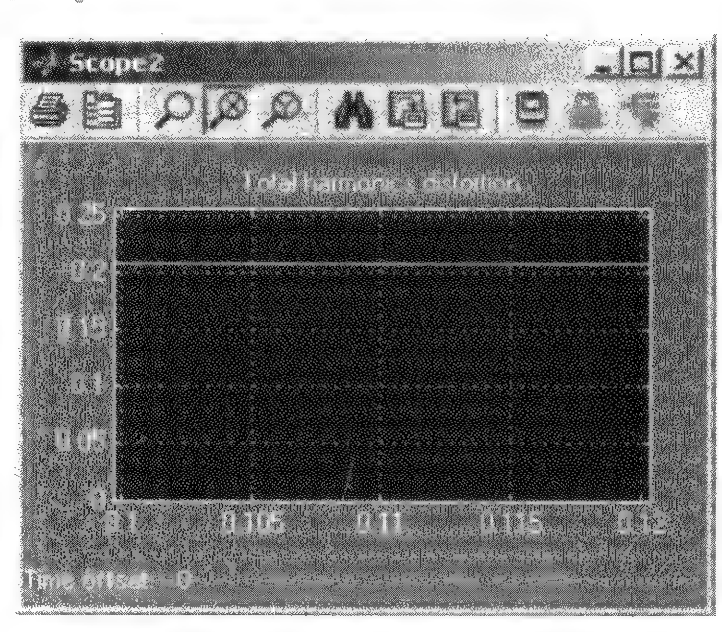


图 8-11　输入电流总谐波畸变率波形

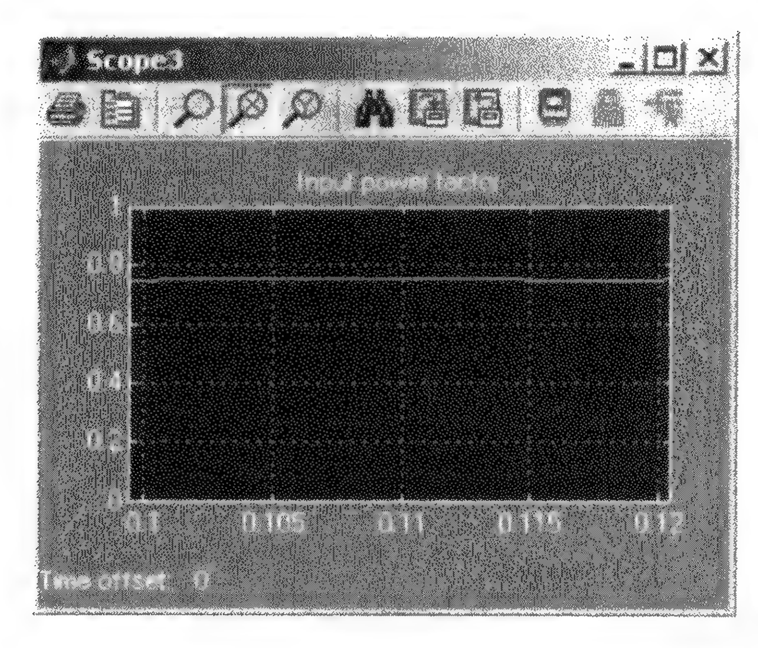


图 8-12 输入功率因数波形

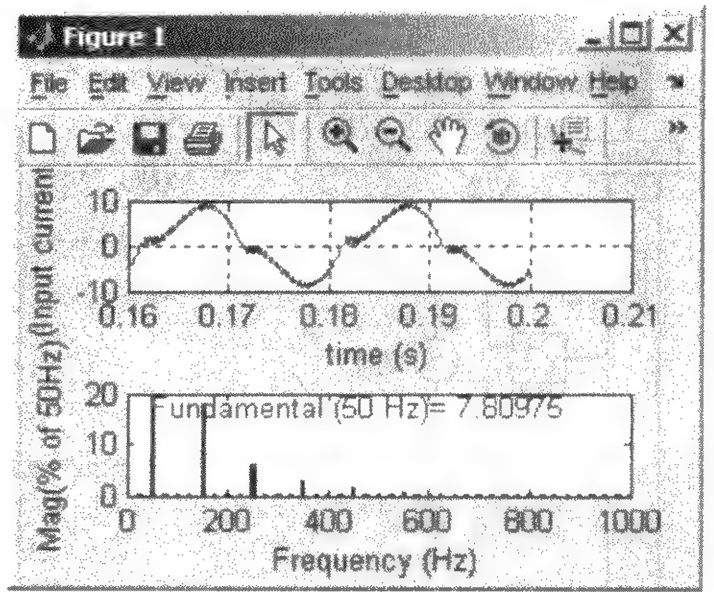


图 8-13 输入电流波形及其频谱

8.2.3 其他单相无源 PFC 电路的仿真分析

8.2.3.1 桥前采用电抗器的串联谐振无源 PFC 电路

参考图 8-2 所示的桥前采用 LC 串联谐振环节的单相无源 PFC 电路，建立如图 8-14 所示的仿真电路图。这种无源 PFC 的工作原理为串联谐振环节产生 3 次

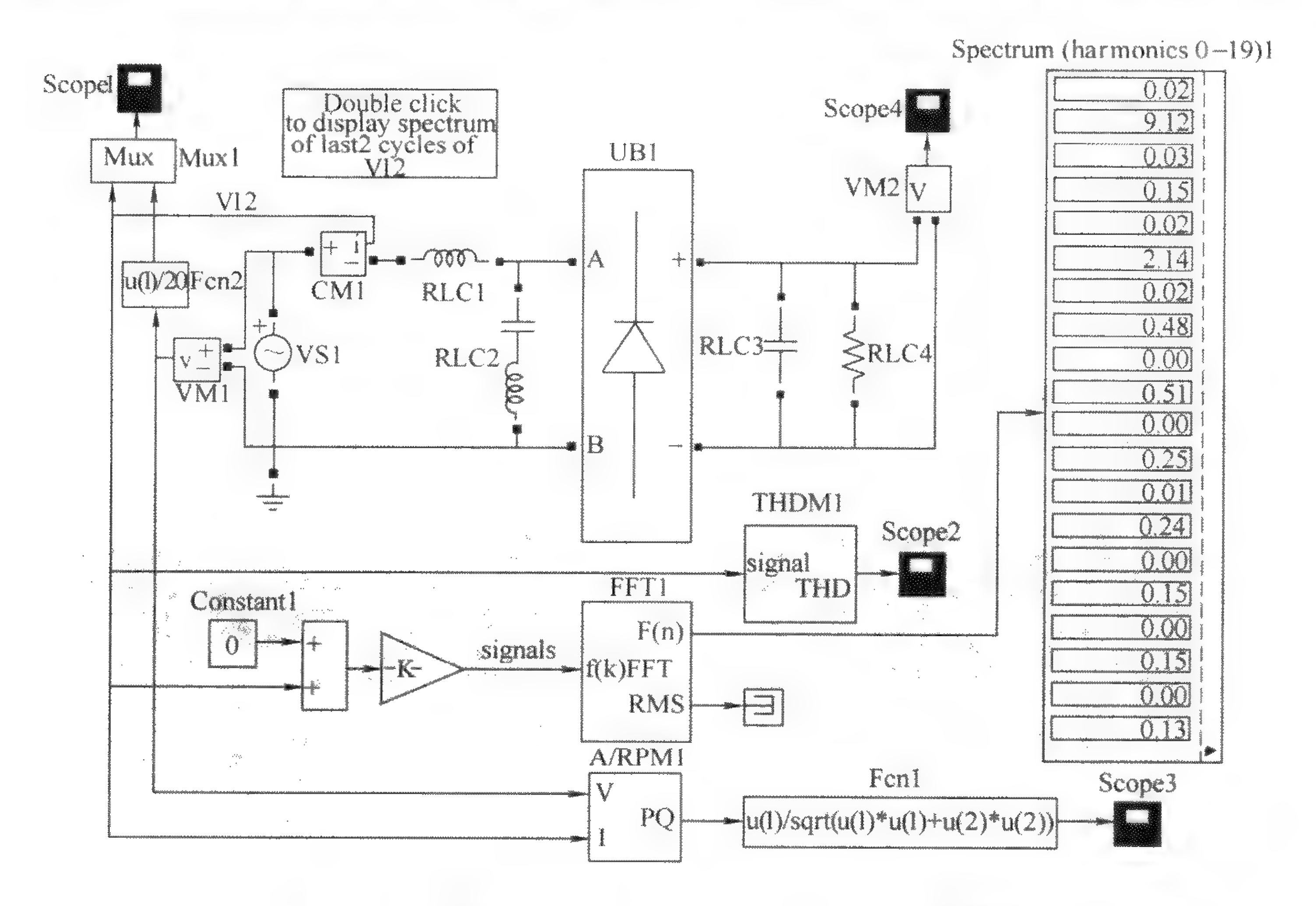


图 8-14 桥前电抗器串联谐振无源 PFC 仿真原理图

谐振，形成3次谐振电流和电压，3次谐振电流可以补偿线路的3次谐波电流，3次谐振电压注入到整流桥，使得直流回路电压升高，提高电源电压的利用率。图中 RLC1 为普通电抗器，取值为 10mH。RLC2 为串联谐振支路，其中电容取值为 19.1μF，电感取值为 59mH，谐振频率为 150Hz。RLC3 为电解电容，取值为 1410μF。RLC4 为电阻负载，取值为 60Ω。仿真电路的其他配置与图 8-9 相同。

仿真结果如下：输入电压与输入电流波形如图 8-15 所示，其中，输入电压幅值缩减为 1/20，输入功率因数为 0.995，THD 为 0.22。输出直流电压波形如图 8-16 所示，输出直流电压的平均值为 300V，纹波电压的峰峰值为 20V。

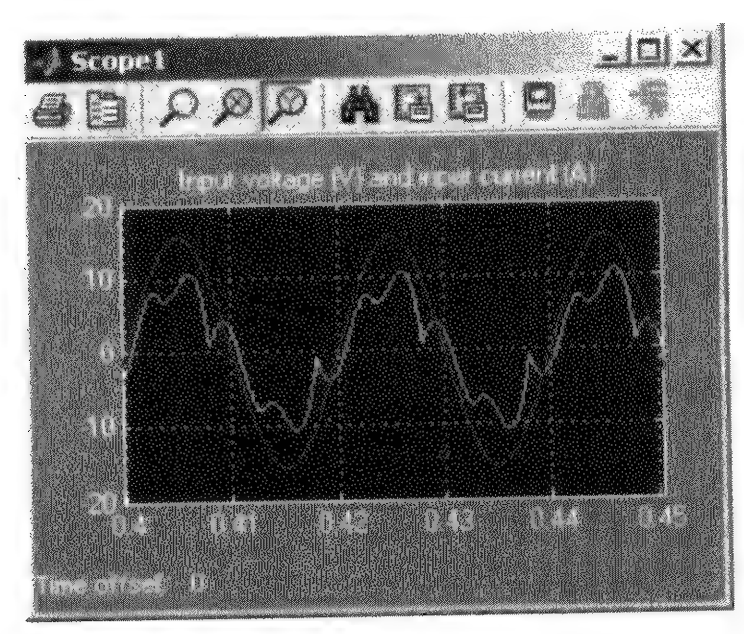


图 8-15　输入电压与输入电流波形

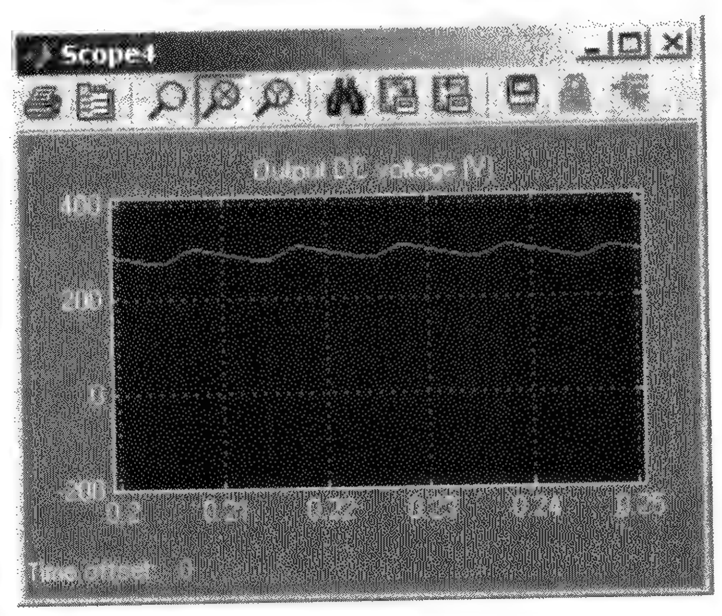


图 8-16　输出直流电压波形

8.2.3.2　桥后采用电抗器的串联谐振无源 PFC 电路

参考图 8-2 所示的桥前采用 LC 串联谐振环节的单相无源 PFC 电路，建立如图 8-17 所示的仿真电路。这种无源 PFC 的工作原理与图 8-2 所示电路相同，只是将普通电抗器移至整流桥后级。图中，RLC2 为普通电抗器，取值为 10mH。RLC1 为串联谐振支路，其中电容取值为 19.1μF，电感取值为 59mH，谐振频率为 150Hz。RLC3 为电解电容，取值为 1410μF。RLC4 为电阻负载，取值为 55Ω。仿真电路的其他配置与图 8-9 相同。

仿真结果如下：输入电压与输入电流波形如图 8-18 所示，其中，输入电压幅值缩减为 1/20，输入功率因数为 0.96，THD 为 0.5。输出直流电压波形如图 8-19 所示，输出直流电压的平均值为 252V，纹波电压的峰峰值为 15V。

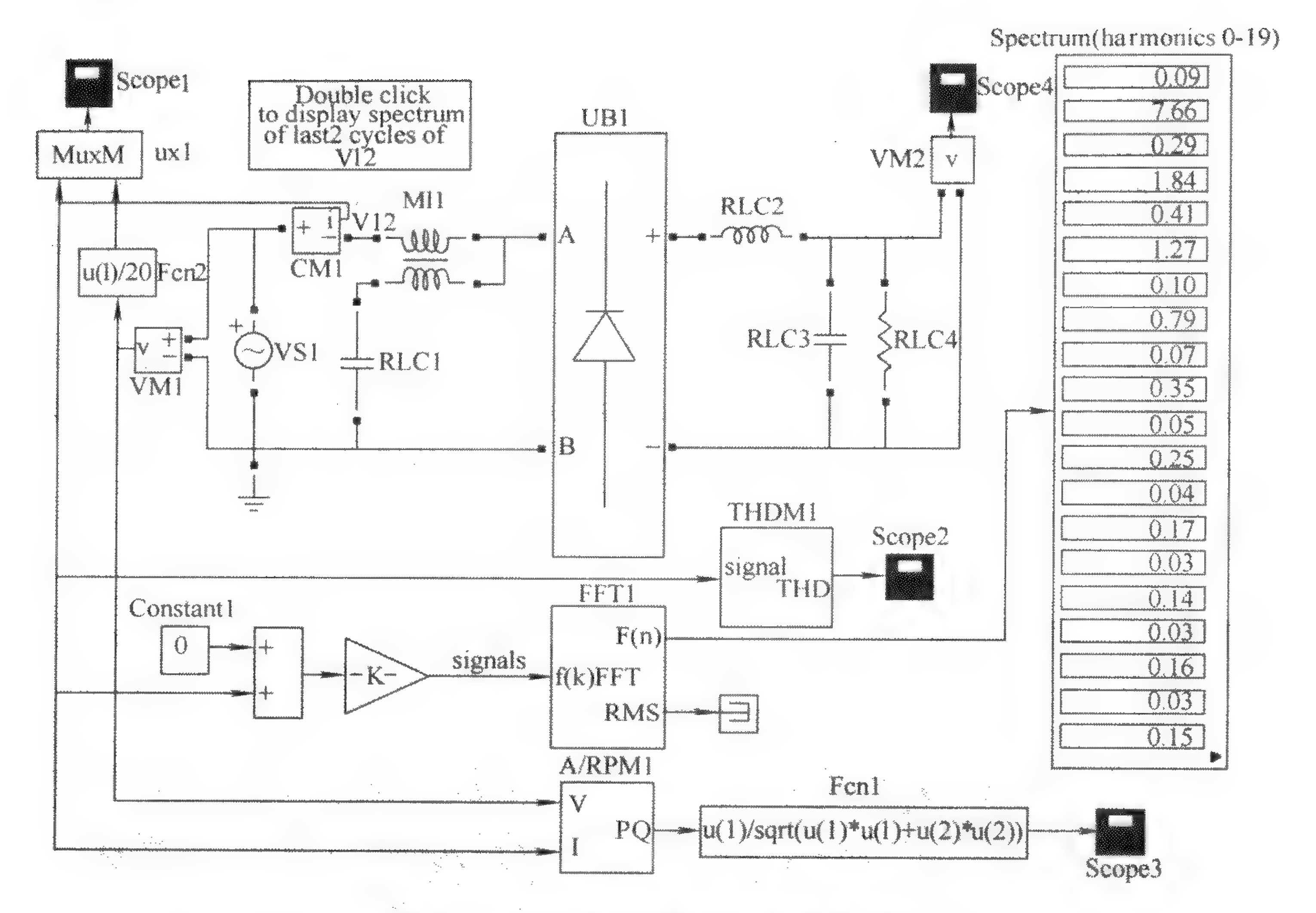


图 8-17　串联谐振无源 PFC 仿真原理图

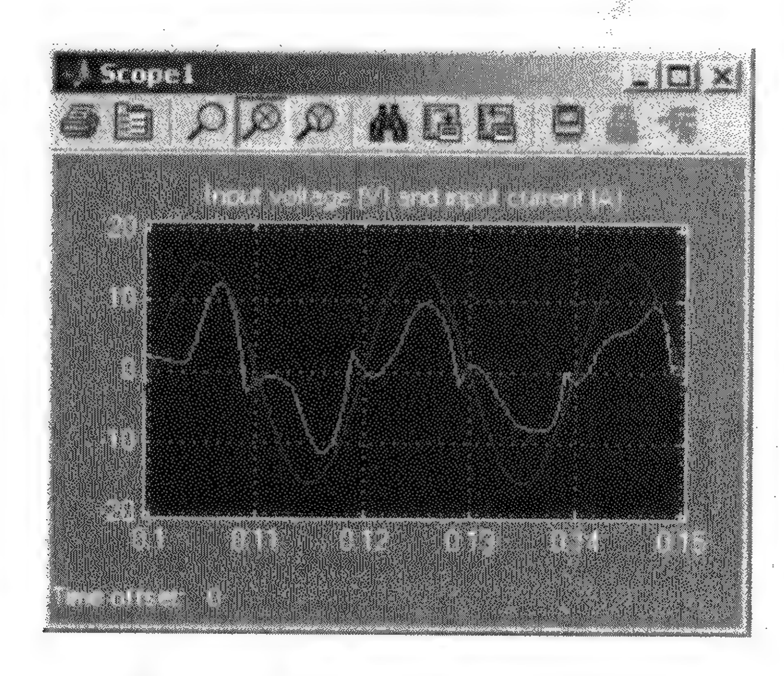



图 8-18　输入电压与输入电流波形

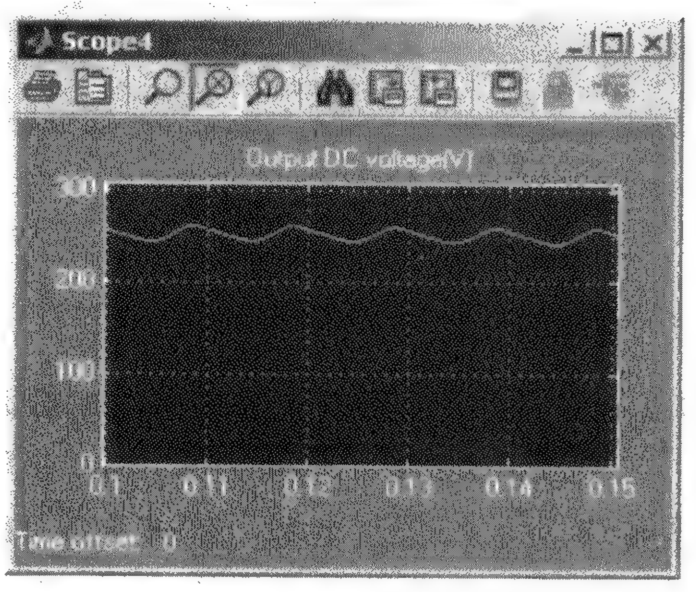


图 8-19　输出直流电压波形

8.3　高功率因数的三相无源 AC-DC 变流器

直接利用三相交流电源供电的负载有阻性负载和感性负载，其输入电流波

形系数接近于1，功率因数只与输入电流位移因数有关。如三相异步电动机负载，其功率因数只与负载角度有关。但是对于前级采用三相不可控整流桥的变流器而言，无论后级带何种负载，由于整流桥的非线性作用，使得输入电流波形严重畸变，特征次谐波含量严重超标，对于6脉波整流桥而言，表现为5次、7次、11次、13次、17次、19次等谐波电流超标，总电流畸变率很高，波形系数较低，功率因数仅为0.65左右，电源容量的利用率降低。随着三相变频器设备的广泛应用，三相不可控桥使用数量日益增加，谐波电流对电网造成的污染和损耗也将越来越严重。为此，可以采用有源或无源功率因数校正手段来抑制或消除谐波电流污染。

对于三相无源PFC，其方案很多，如为了改善输入电流的波形系数，利用移相变压器的多脉波整流技术，如12脉波整流器和24脉波整流器，或利用移相电抗器构造的12脉波整流器技术，3次谐波电流注入的6脉波整流技术。另外，单相无源PFC的许多技术方案经过适当改动后都可以用作三相无源PFC技术。本节主要涉及由三相移相电抗器构造的12脉波整流器技术的工作原理，并给予仿真分析；对12脉波整流器、3次谐波电流注入的6脉波整流技术、桥前LC滤波整流技术、桥后LC滤波整流技术和自然整流进行原理简述和仿真分析。

8.3.1 三相无源功率因数校正的电路型式

桥后采用电抗器的三相无源PFC电路如图8-20所示，桥前采用LC滤波器的三相无源PFC电路如图8-21所示，桥前采用移相电抗器的三相无源PFC电路如图8-22所示，桥前采用3次谐波注入的三相无源PFC电路如图8-23所示，桥前同时采用谐振电抗器和电抗器的三相无源PFC电路如图8-24所示，桥前采用谐振电抗器桥后采用电抗器的三相无源PFC电路如图8-25所示。本文重点分析桥前采用移相电抗器的三相无源PFC电路的工作原理，并给其他几种三相无源滤波器电路的仿真分析。

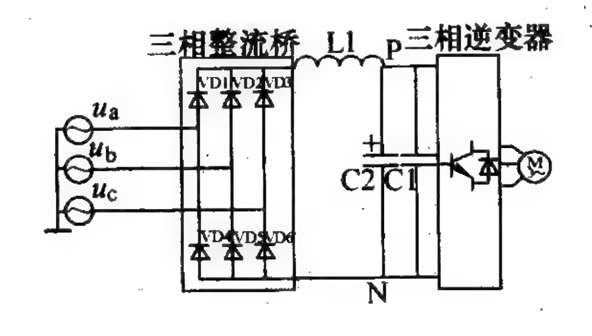


图8-20 桥后采用电抗器的三相无源PFC电路

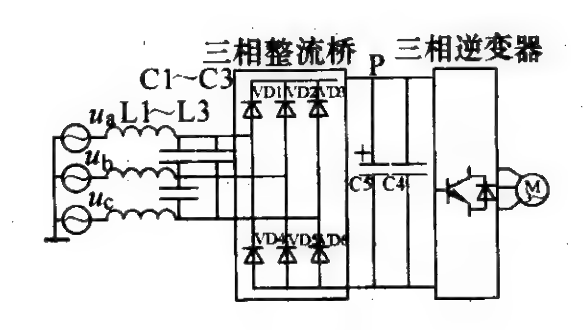


图8-21 桥前采用LC滤波器的三相无源PFC电路

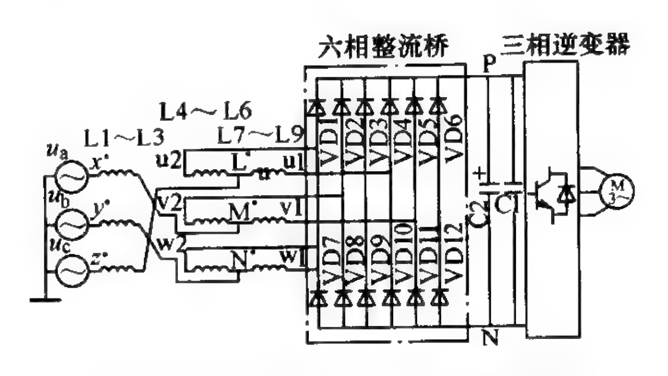


图 8-22　桥前采用移相电抗器的三相无源 PFC 电路

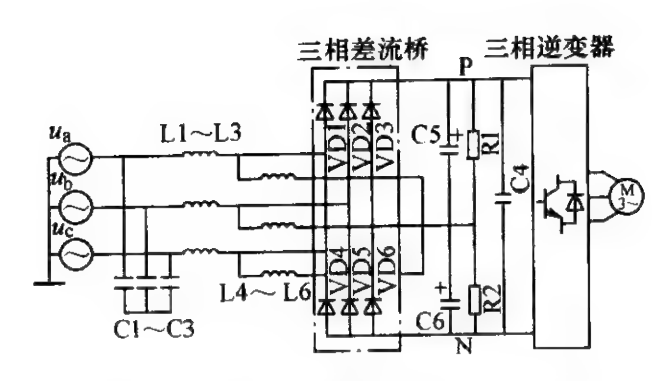


图 8-23　桥前采用 3 次谐波注入的三相无源 PFC 电路

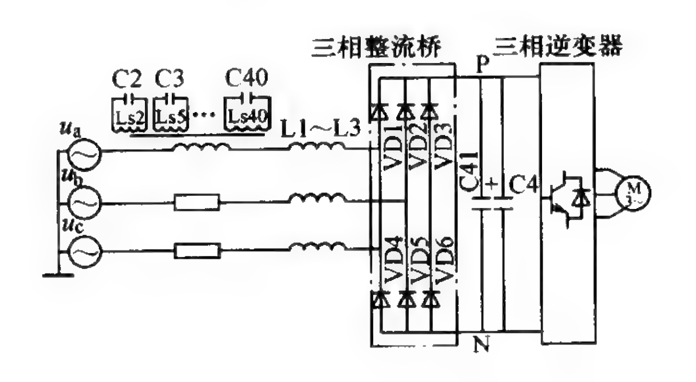


图 8-24　桥前同时采用谐振电抗器和电抗器的三相单相无源 PFC 电路

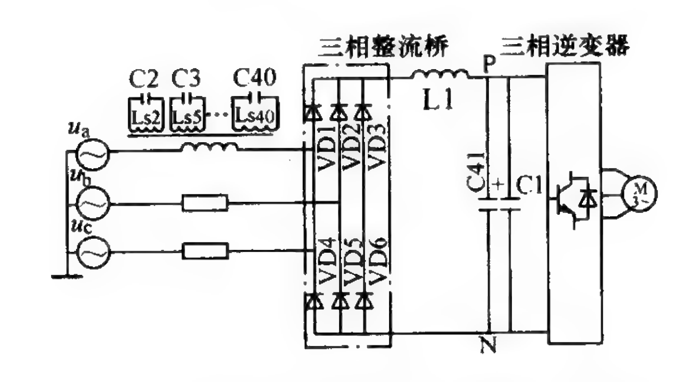


图 8-25　桥前采用谐振电抗器桥后采用电抗器的三相无源 PFC 电路

8.3.2　基于三相移相电抗器的 12 脉波整流器

8.3.2.1　移相电抗器在三相无源 PFC 中的使用原理

移相电抗器的作用是用来抑制或消除电力半导体变流装置和非线性负载产生的谐波电流和电压对供电系统的影响。考虑到三相对称供电系统中的一般以 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波电流含量较大且对系统影响较严重，故移相电抗器可主要针对综合抑制这几次谐波电流来设计。其工作原理可由图 8-26 所示的电路联结图和相量图说明。

如图 8-26a 所示，将一相输入电流 I 分成两个支路电流 I' 和 I''。通过适当选取移相绕组的匝数和接线方式可使支路电流的基波成分 I_1' 和 I_1'' 相对于输入电流基波 I_1 分别移相 α 角和 $-\alpha$ 角，这样基波相电流与支路电流的相量关系如图 8-26b 所示。由于 α 角较小，总的相电流基波成分 $I_1 = I_1' + I_1'' \approx 2I_1'$，即采用移相后对基波电流的影响不大。但是，采用移相接法对谐波电流的影响却较大。以 5 次谐波电流为例，两个支路的 5 次谐波电流 I_5' 和 I_5'' 相对于相电流基波 I_1 分别移相 5α 角和 -5α 角，如图 8-26c 所示。由于 I_5' 和 I_5'' 接近于大小相等方向相反，使得线路电流中的 5 次谐波成分几乎相互抵消，达到抑制谐波电流的目的。如果 $\alpha = 18°$，则可以完全消除 5 次谐波。通过一次移相消除所有次谐波电流成分是不可能的，为此可以增加多级移相电抗器，分别完全

消除5次、7次、11次、13次…谐波电流，但是这样带来设计复杂、成本升高。为此可以综合考虑，采用一级移相来抑制主要次谐波电流。如果主要滤除影响比较大的5次、7次谐波电流，可以选择 $\alpha = 11°$，此时三相移相电抗器的电压相量如图8-27所示。移相电抗器的设计可以借助三相供电电压相差依次为120°的特点，详细设计参见有关文献及图8-22和图8-27所示。

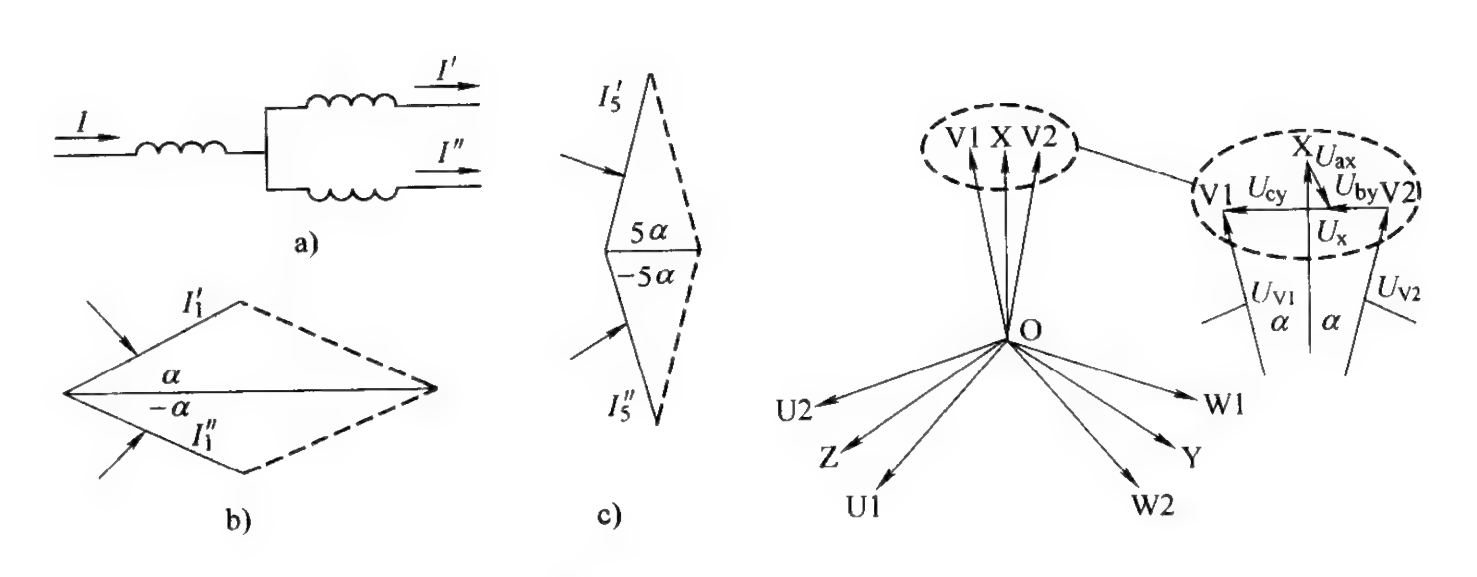


图8-26　三相移相电抗器的工作原理
a）移相绕组联结　b）基波电流相量　c）5次谐波电流相量

图8-27　三相移相电抗器的电压相量

8.3.2.2　移相电抗器在三相无源PFC中的仿真分析

基于图8-22，采用MATLAB 7.0的SIMULINK 6.0建立如图8-28所示的仿真电路。其中解算选项如下：变步长，最大步长为1e－5s，相对精度为1e－3，算法选择ode23t（mod. Stiff/trapezoidal)，其他选项选择默认值。图中VS1～VS3为标准正序三相正弦电压源，相电压有效值为220V。RLC1～RLC3为三相输入电抗器，取值为1mH，为了便于收敛，串联0.01Ω的电阻。RLC4为桥后平波电抗器，取值为10μH。RLC5为电解电容，取值为1840μF。RLC6为电阻负载，取值为50Ω。

Subsystem1为子系统，如图8-29所示，包括三只独立的三相耦合电感MI1、MI2和MI3，还包括一个12脉波不可控整流桥，其中整流桥的拓扑结构如图8-30所示。仿真中每只耦合电感的绕组1的电阻和电感分别为0.01Ω和20μH，绕组2的电阻和电感分别为0.01Ω和8μH，绕组3的电阻和电感分别为0.01Ω和9μH，互电阻和互电感分别为0.1Ω和2μH。

图8-28中的其他部分仿真电路不再描述。图中表格为仿真获得的0～19次输入电流的各次谐波电流幅值，其中基波电流幅值为9.37A，3次谐波电流的幅值为0.34A，5次谐波电流的幅值为1.25A，7次谐波电流的幅值为0.54A，可见各次谐波电流均符合IEC61000—3—2/EN61000—3—2标准的规定。

图 8-28 采用移相电抗器的三相无源 PFC 仿真电路

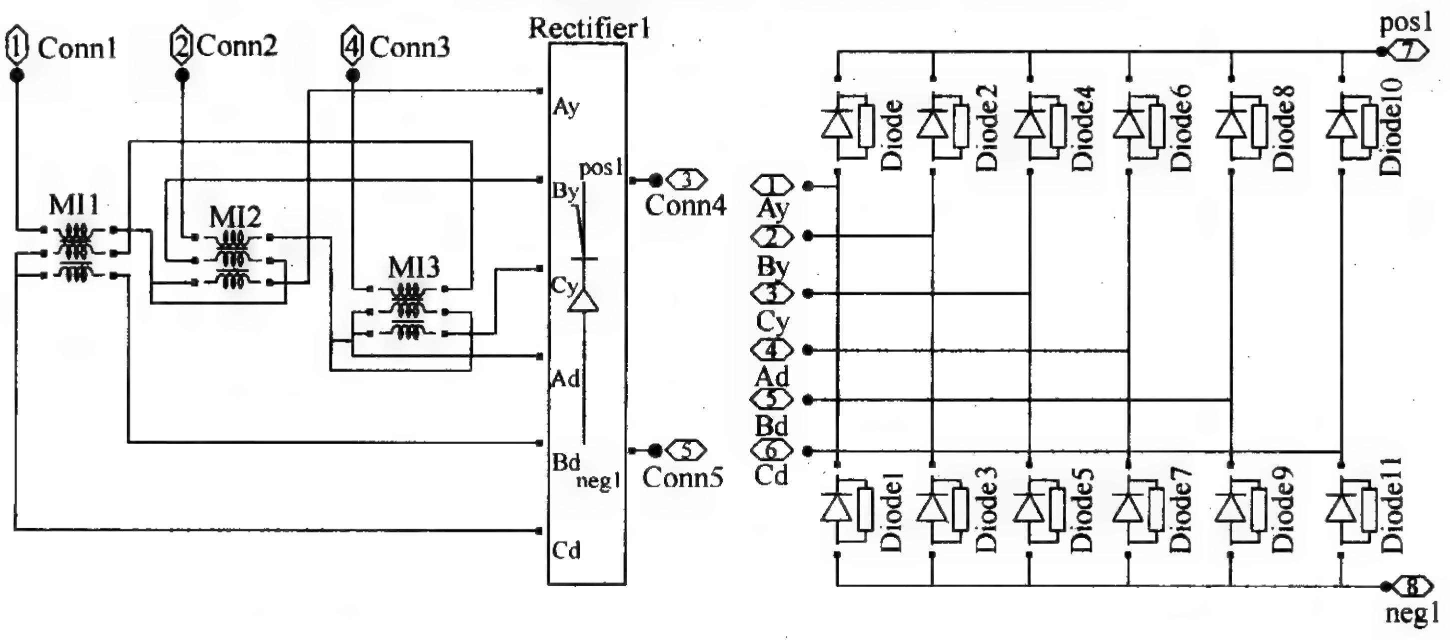


图 8-29 三相耦合电感与 12 脉波整流桥接线

图 8-30 12 脉波整流桥拓扑结构

仿真结果如下：示波器 Scope1 中显示了输入电压与输入电流波形，如图 8-31 所示，其中输入电压幅值缩减为 1/20，可见输入电流波形的正弦度较高，位移角度为 27°，位移因数为 0.891。示波器 Scope2 中显示了输入电路总谐波畸变率波形，THD 为 0.154。示波器 Scope3 中显示了输入功率因数波形，PF 为 0.90 左右。Scope4 显示了输出直流电压波形，平均值为 444.0V，纹波电压峰峰值为 2V。频谱显示器中显示了输入电流波形与频谱，如图 8-32 所示，与图 8-28 中表格的结果相近。

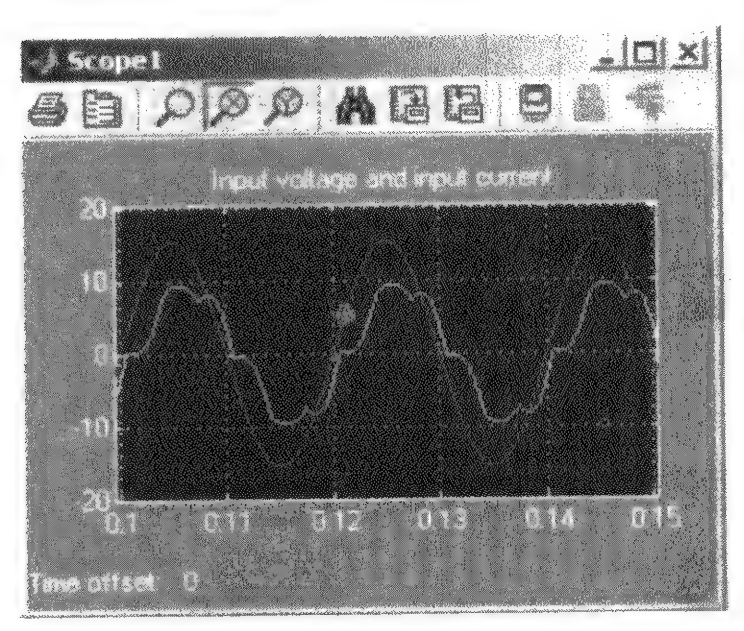


图 8-31　输入电压与输入电流波形

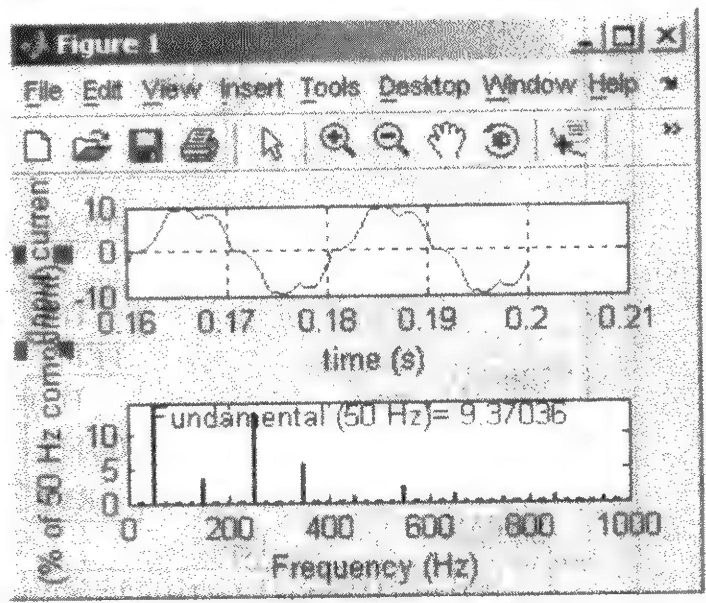


图 8-32　输入电流及其频谱

8.3.3　其他三相无源 PFC 电路的仿真分析

8.3.3.1　桥后采用单电抗器的三相无源 PFC 电路

参照图 8-20 所示的桥后采用单电抗器的三相无源 PFC 电路建立的仿真电路如图 8-33 所示。图中 RLC1 为桥后平波电抗器，取值为 15mH。RLC2 为电解电容，取值为 1840μH。RLC3 为电阻负载，取值为 50Ω。其他部分说明与图 8-28 相同。

仿真结果如下：示波器 Scope1 中显示了输入电压与输入电流波形，如图 8-34 所示，其中输入电压幅值缩减了 20 倍，可见输入电流波形的正弦度较高，位移角度 0°，位移因数为 1。示波器 Scope2 中显示了输入电路总谐波畸变率波形，THD 为 0.30。示波器 Scope3 中显示了输入功率因数波形，PF 为 1 左右。Scope4 显示了输出直流电压波形，平均值为 513.0V，纹波电压的最大峰峰值为 2V。频谱显示器中显示了输入电流波形与频谱，如图 8-35 所示，与图 8-33 中表格的结果相近。显然这种三相无源 PFC 的效果较差。

图 8-33　桥后单电抗器的三相无源 PFC 仿真电路

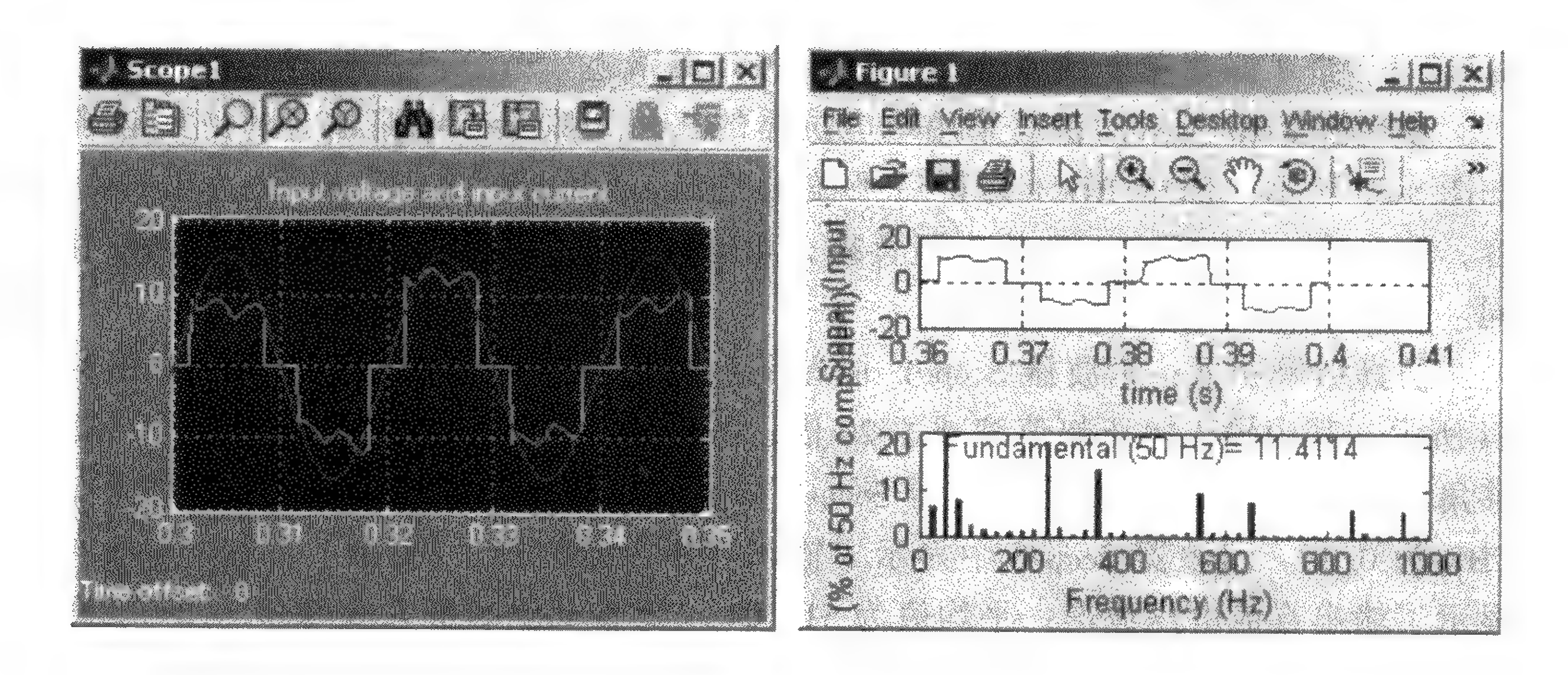


图 8-34　输入电压与输入电流波形

图 8-35　输入电流波形及其频谱

8.3.3.2 桥前 LC 滤波的三相无源 PFC 电路

按图 8-21 所示的桥前 LC 滤波的三相无源 PFC 电路建立的仿真电路，如图 8-36 所示。图中 RLC1 ~ RLC3 为桥前三相滤波电感，取值为 15mH。RLC4 ~ RLC6 为桥前三相滤波电容，取值为 10μF，为了便于收敛，串联有 0.01Ω 电阻。RLC7 为电解电容器组，取值为 1840μF。RLC8 为电阻负载，取值为 50Ω。其他部分说明与图 8-28 相同。

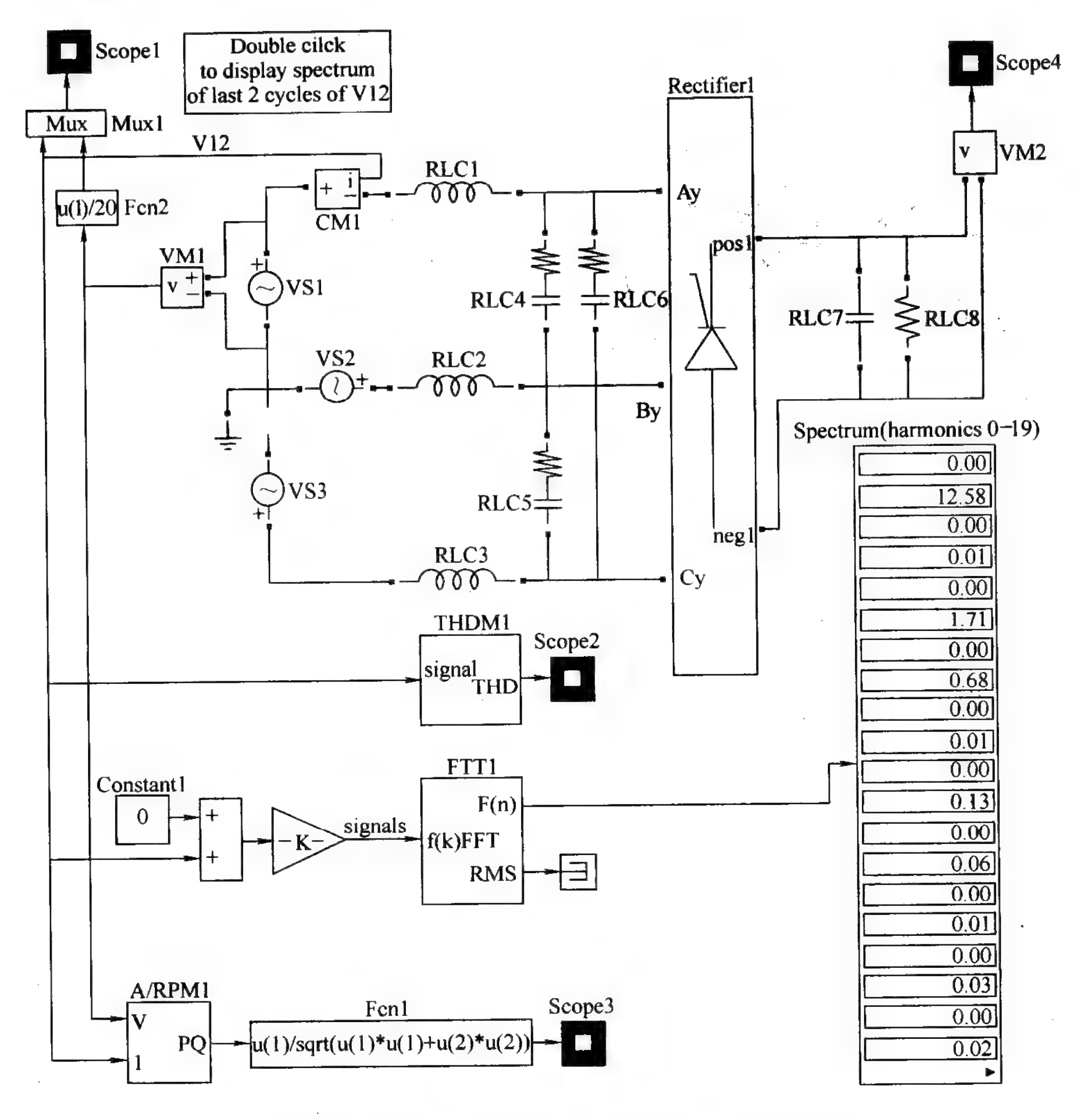


图 8-36 桥前 LC 滤波器的三相无源 PFC 仿真电路

仿真结果如下：示波器 Scope1 中显示了输入电压与输入电流波形，如图 8-37 所示，其中输入电压幅值缩减了 20 倍，可见输入电流波形的正弦度较高，位

移角度接近 0°，位移因数为 0.992。示波器 Scope2 中显示了输入电路总谐波畸变率波形，THD 为 0.15。示波器 Scope3 中显示了输入功率因数波形，PF 约为 0.97。Scope4 显示了输出直流电压波形，平均值为 533.5V，纹波电压的最大峰峰值为 1V。频谱显示器中显示了输入电流波形与频谱，如图 8-38 所示，与图 8-36 中表格的结果相近。

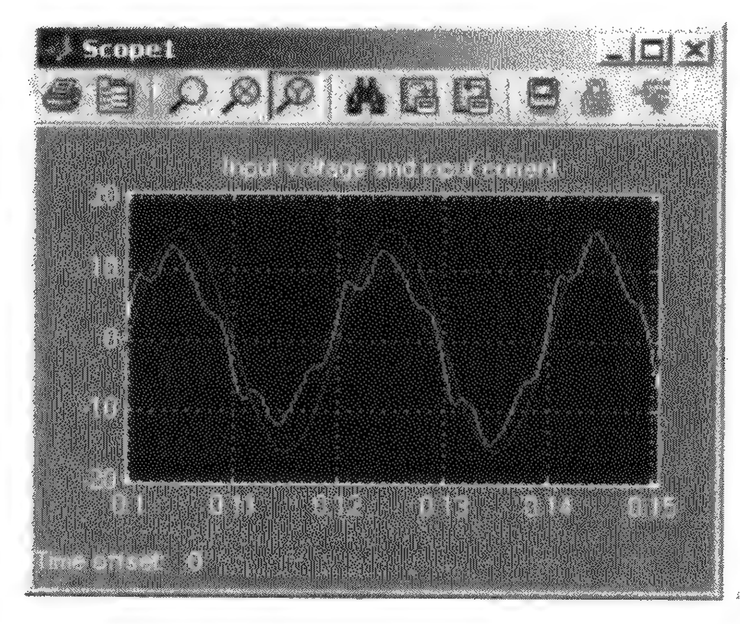


图 8-37　输入电压与输入电流波形

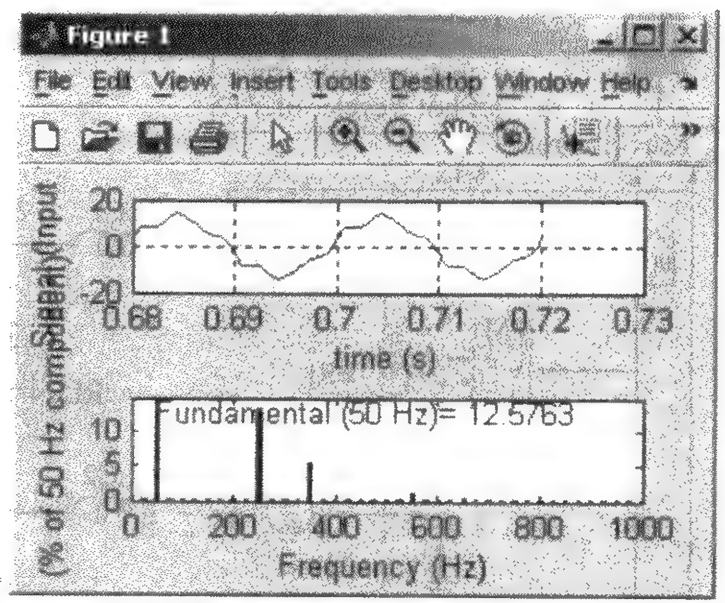


图 8-38　输入电流波形及其频谱

8.3.3.3　3 次谐波注入的三相无源 PFC 电路

参照图 8-23 所示的 3 次谐波注入三相无源 PFC 电路的仿真电路，如图 8-39 所示。图中 RLC1 ~ RLC3 为桥前三相滤波电容，取值为 50μF，串联有 0.01Ω 的电阻。RLC4 ~ RLC6 为桥前三相滤波电感，取值为 10mH。RLC7 为桥后电抗器，取值为 10mH。RLC7 和 RLC9 为电解电容，单只取值为 1840μF。RLC10 和 RLC11 为等值均压电阻，单只取值为 51kΩ。RLC12 为电阻负载，取值为 50Ω。MI1 为三相耦合电感，绕组 1、2 和 3 的自阻和自感均为 0.0001Ω 和 200μH，互阻和互感分别为 0.11Ω 和 150μH。其他部分说明与图 8-28 相同。

仿真结果如下：示波器 Scope1 中显示了输入电压与输入电流波形，如图 8-40 所示，其中输入电压幅值缩减了 20 倍，可见输入电流波形的正弦度较高，位移角度 18°，位移因数为 0.951。示波器 Scope2 中显示了输入电路总谐波畸变率波形，THD 为 0.21。示波器 Scope3 中显示了输入功率因数波形，PF 为 0.862 左右。Scope4 显示了输出直流电压波形，平均值为 405V，纹波电压的最大峰峰值为 0.1V。频谱显示器中显示了输入电流波形与频谱，如图 8-41 所示，与图 8-39 中表格的结果相近。

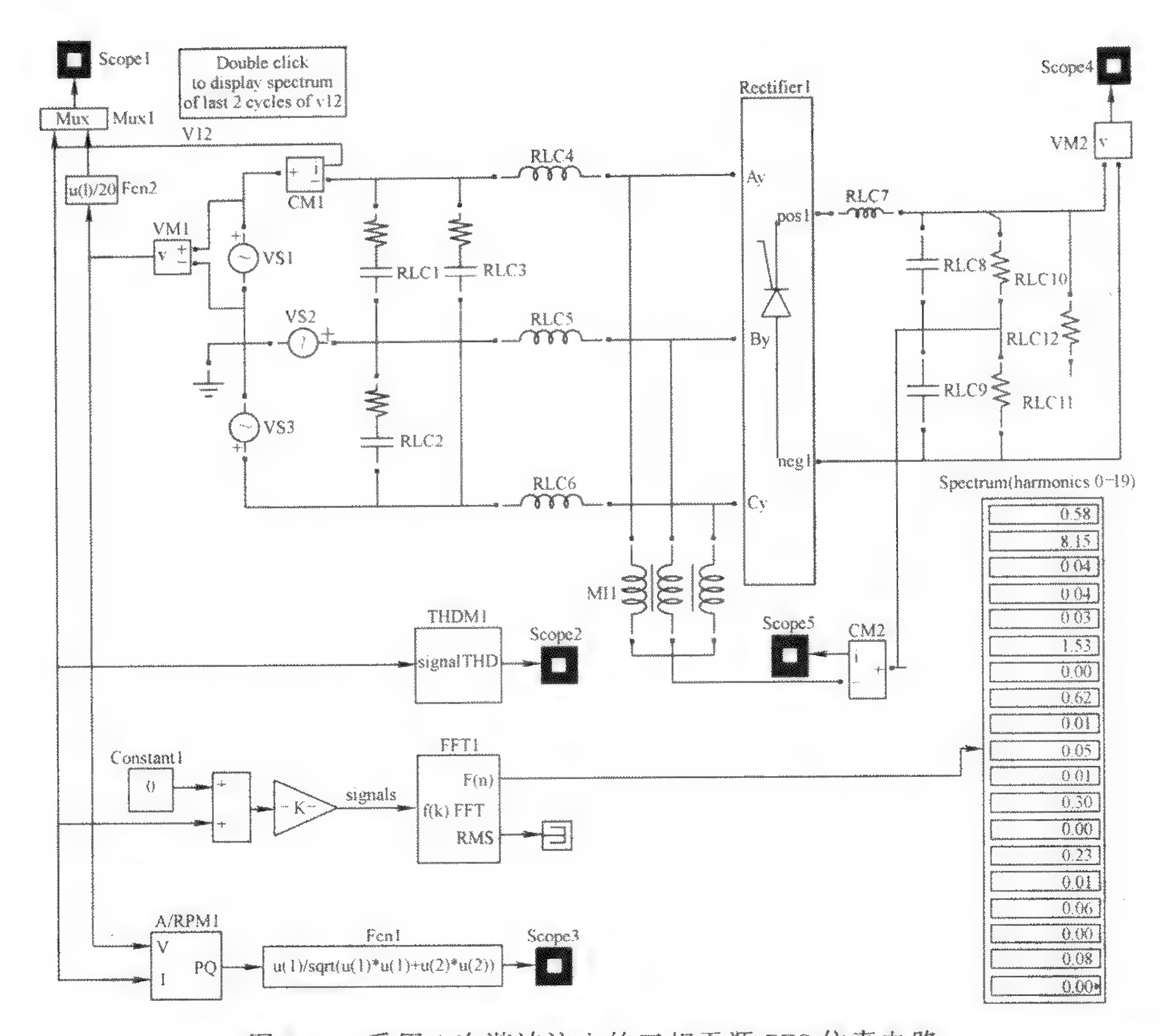


图 8-39 采用 3 次谐波注入的三相无源 PFC 仿真电路

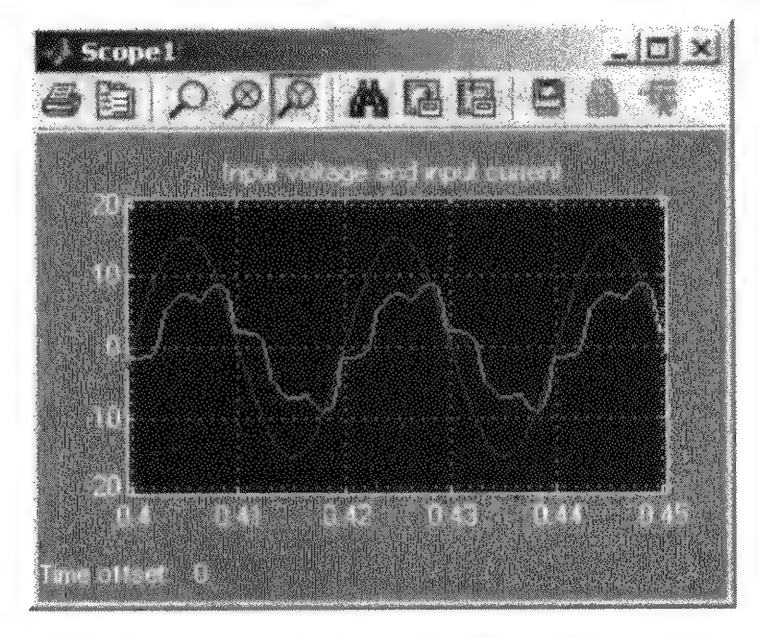



图 8-40 输入电压与输入电流波形

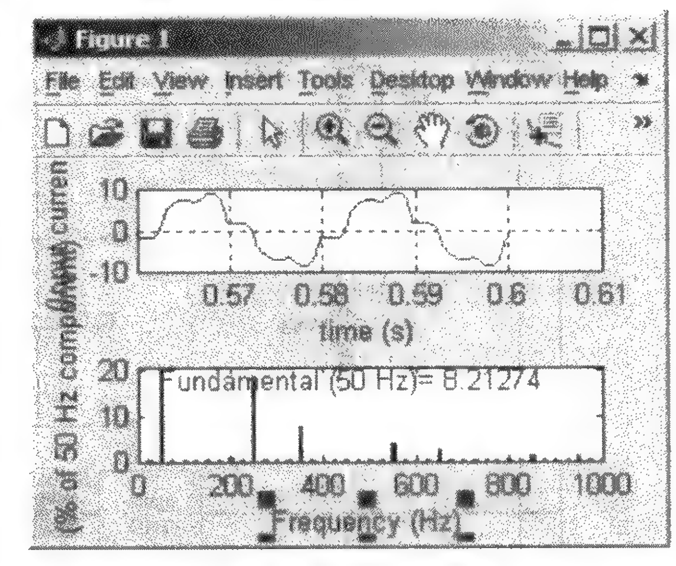


图 8-41 输入电流波形及其频谱

8.3.3.4 基于移相变压器的 12 脉波整流电路

采用移相变压器的 12 脉波整流电路拓扑结构如图 8-42 和图 8-43 所示，其中 L1 ~ L3、C1 ~ C3 构成输入 LC 滤波器，其后级为移相变压器，移相变压器采用

两组接法，Yg/△联结和 Yg/Y 联结。经过输入 LC 滤波器的输入电压通入移相变压器后，得到互差 30°的六相对称电压，供给六相整流器，为后级电解电容器组供电，不仅可以降低直流回路电压的纹波峰峰值，而且可以获得一个正弦度很高的输入电流。其中图 8-42 中的整流器为两组三相整流器的串联，图 8-43 中的整流器为一组六相整流器，因此在变压器的变比相同的情况下，前者输出电压的等级高于后者。

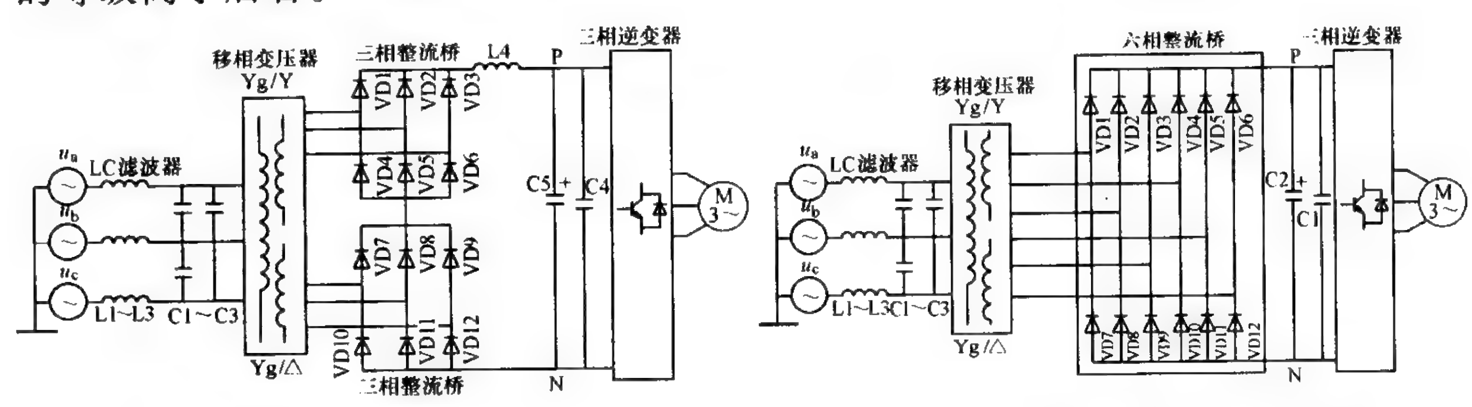


图 8-42 移相变压器的 12 脉波整流电路拓扑结构 1

图 8-43 移相变压器的 12 脉波整流电路拓扑结构 2

参照图 8-42 建立的仿真电路，如图 8-44 所示。图中 RLC1 ~ RLC3 为桥前三相滤波电感，取值为 5mH 为便于仿真收敛，串联有一个阻值很小的电阻。RLC4 ~ RLC6 为桥前三相滤波电容，取值为 25μF。RLC7 为桥后平波电抗器，取值为

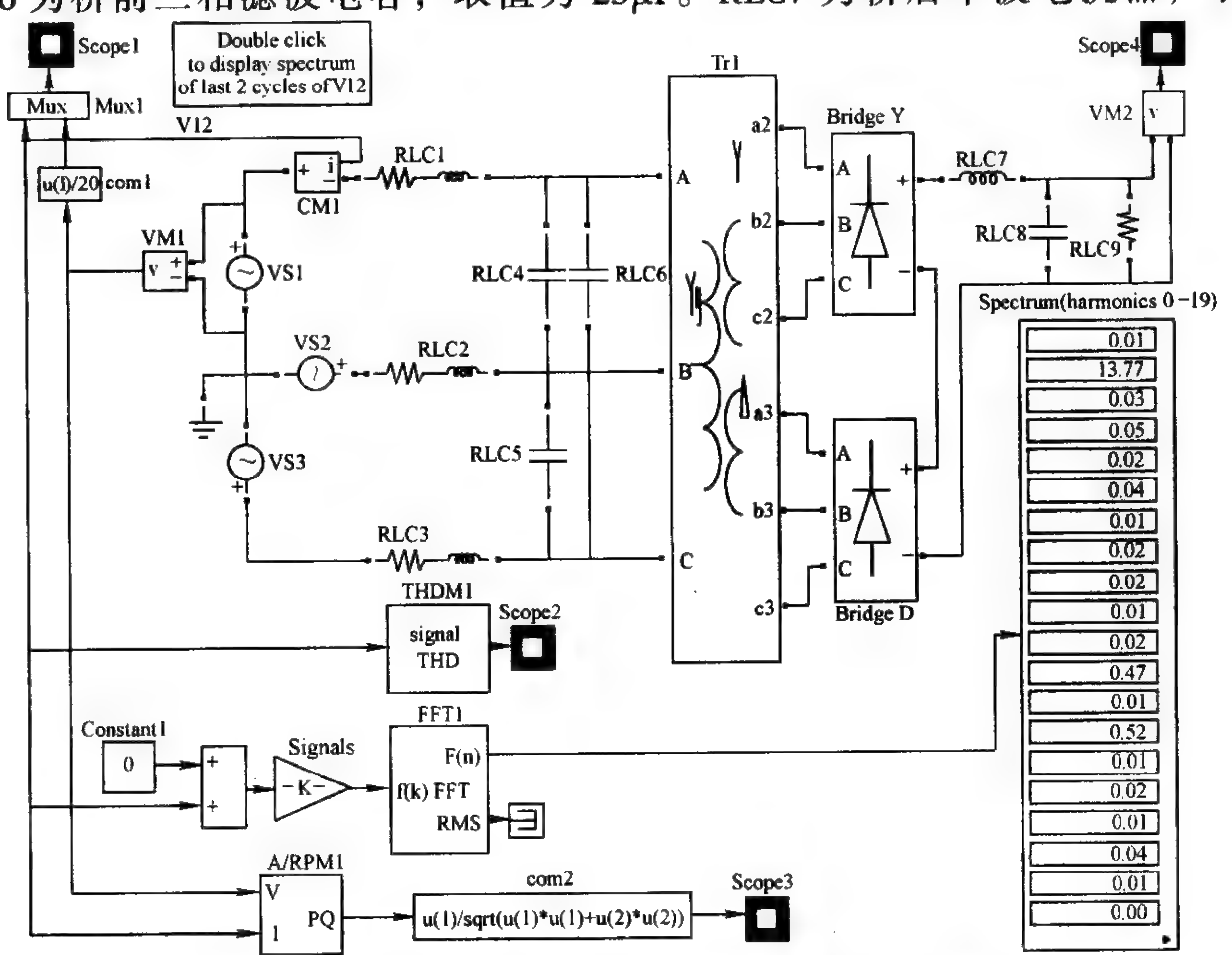


图 8-44 采用移相变压器的 12 脉波整流器仿真电路

10μH，也可以取消不用。RLC8 为电解电容器组，取值为 1840μF。RLC9 为电阻负载，取值为 50Ω。其他部分说明与图 8-28 相同。

仿真结果如下：示波器 Scope1 中显示了输入电压与输入电流波形，如图 8-45 所示，其中输入电压幅值缩减了 20 倍，可见输入电流波形的正弦度较高，超前位移角度 27°，位移因数为 0.891。示波器 Scope2 中显示了输入电路总谐波畸变率波形，THD 为 0.05。示波器 Scope3 中显示了输入功率因数波形，PF 为 0.88 左右。Scope4 显示了输出直流电压波形，平均值为 529V，纹波电压峰峰值为 1.5V。频谱显示器中显示了输入电流波形与频谱，如图 8-46 所示，与图 8-44 中表格的结果相近。

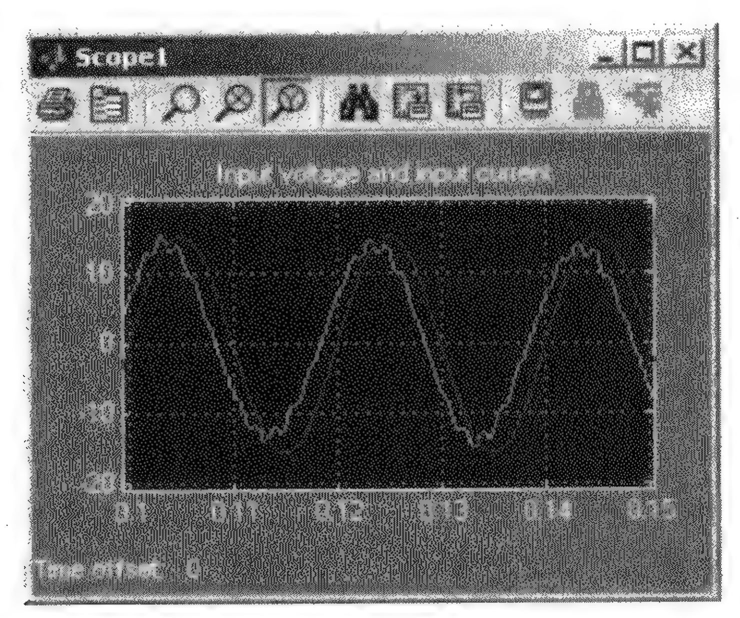


图 8-45　输入电压与输入电流波形

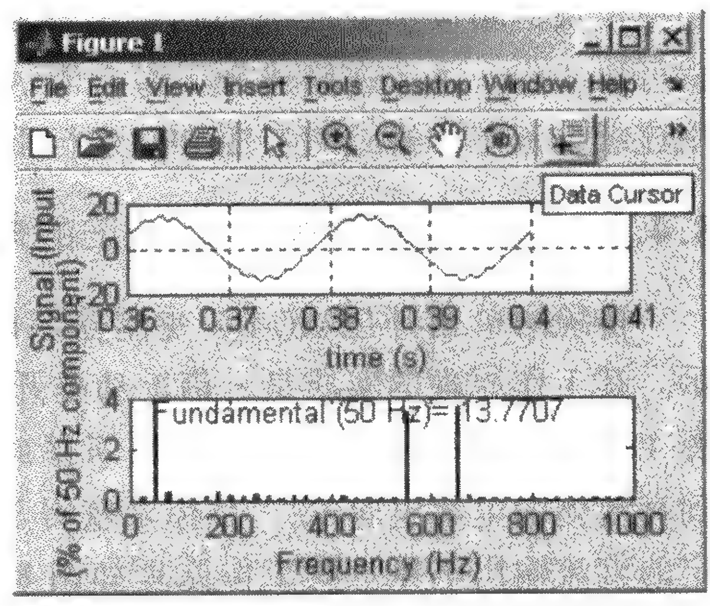


图 8-46　输入电流波形及其频谱

8.4　单位功率因数单相有源 AC-DC 变流器

虽然无源 PFC 有很多优点，如①技术成熟，价格偏低；②坚固耐用，安全可靠；③不用考虑电路分布电感；④合适的方案和布线可以降低系统产生的电磁干扰（EMI）强度，并且提高电磁敏感度（EMS）水平等。但是也有许多不足，如①需要安装空间大，一般需要板外安装；②需要考虑功率损耗和解决发热问题；③电压损失过大，随着负载电流的增加，电压损失加重，而且不能升压和调压；④需要过多铜材，体积大，重量大，参数匹配也比较困难；⑤电流谐波抑制效果差，虽然功率因数可以提升到 0.94 甚至更高，但是电流畸变因数并不一定很满意，谐波电流含量还是较高。无源 PFC 的这些缺点正是有源 PFC 的优点。

有源 PFC 包括部分有源 PFC 和完全有源 PFC 两种，部分有源 PFC 的校正效

果大体上介于无源 PFC 和完全有源 PFC 之间。完全有源滤波技术已经成熟，控制效果完善，一般认为输出功率上限可达 5.0kW 以上，如果需要提高输出功率，也可以采用并联交错结构。许多著名 IC 生产厂商都推出了各自的全模拟有源 PFC 控制器，如 TDA16888、L4981A/B、L6561、UC3854AN/BN 以及 UCC3818 等。个别芯片除了具有有源 PFC 功能外，还具备用于开关电源的 PWM 功能和/或具有开关频率调制能力，后者可以大大改善系统的 EMC 环境。对于小功率有源 PFC（≤150W），大都采用断续电流工作模式（DCM）或临界电流工作模式（CRM）。对于大功率有源 PFC，一般采用平均电流采样方式和连续电流工作模式（CCM），这也是一种改善 EMI 的措施。国内及国外多家厂家推出了专用有源 PFC 功率模块，集成部分或全部功率电路和控制电路，只需外接升压电感或整流桥就可以工作。本节在简述升压型有源 AC-DC 变流器基本工作原理的基础上，采用连续电流工作模式对有源 PFC 进行重点仿真分析。

8.4.1 单相有源功率因数校正的电路型式

传统的单相升压 AC-DC 变流器，即单相有源 PFC 的拓扑结构如图 8-47 所示。其工作原理的实质是：借助功率开关管 V1 有规律的通断，通过整流桥将电源 V_S 短路，使得电感 L1 不断地储存能量，并且将全部储能或者部分储能释放到直流侧的电解电容 C2，目标是获得与电源电压同步的正弦输入电流波形和稳定的直流输出电压。其工作原理如图 8-48 所示，主要包含一个乘法器、一个电压闭环和一个电流闭环。乘法器负责将电压误差放大器输出、输入电压参考波形与电源电压有效值二次方的倒数相乘，得到综合的电流参考信号。电源电压有效值二次方的倒数可以用来调节输入电压范围，以满足宽范围电压供电的要求，如交流 85～275V。电压闭环负责将给定电压与实际电压进行误差放大，目标是维持输出电压稳定。电流闭环负责将电流参考信号与实际检测电流信号相比较后进行 PI 调节，并产生最终控制信号，与三角载波比较后得到实际 PWM 信号，驱动功率开关管V1。R_S为检测电流用低阻值无感电阻，流过R_S的电流即

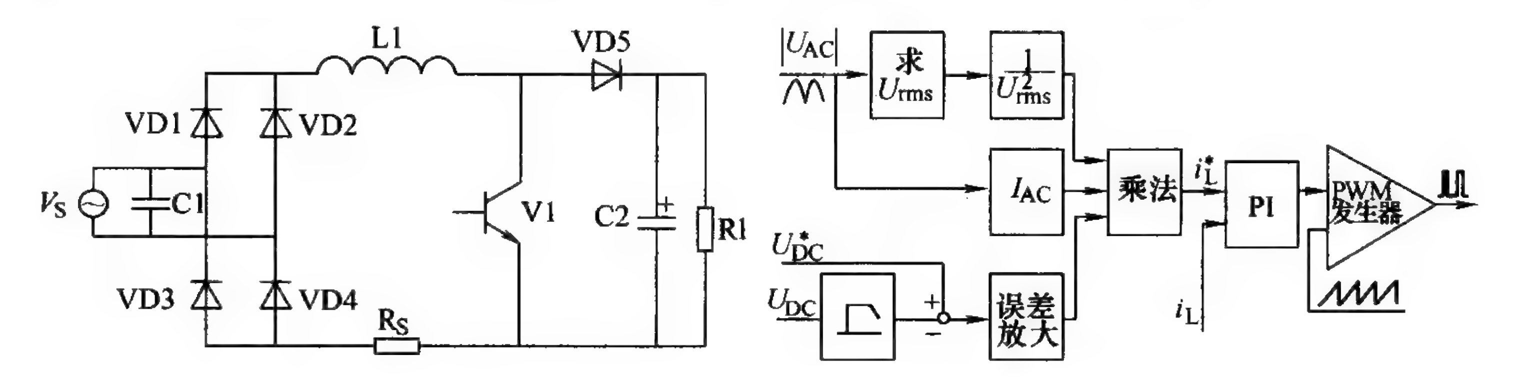


图 8-47　传统单相有源 PFC 的拓扑结构　　　　图 8-48　传统单相有源 PFC 的工作原理

升压电感 L1 的电流，作为电流闭环 PI 调节器的一个输入。电感 L1 的电流经过输入电容 C1 的吸收之后得到纹波电流比较低的正弦输入电流，且与输入电压同步。

传统单相升压 AC-DC 变流器的特征是，升压电感与功率开关置于整流桥之后，功率开关短路的是整流后的正弦半波电压，因此也可以说单相有源 PFC 为 DC-DC 变流器，而整流桥才是 AC-DC 变流器。基于该原理，传统的升压式单相 AC-DC 变流器可以进行演化。根据功率开关的位置，相对于整流桥而言，可以演化出的很多种拓扑结构，而基本工作原理不变，但在输入电压波形检测与有效值检测、电感电流检测、独立电源的路数（驱动电源和 PFC 芯片工作电源，某些拓扑可以采用热地单电源方案）、升压电感为直流电感或交流电感、输出电压检测方式以及使用器件数量等方面与传统单相 PFC 存在差别。其中

（1）反向快速恢复二极管低端的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-49 所示，差别在于功率开关管 V1 的驱动电源地与电解电容后级地不同。

（2）升压电感低端的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-50 所示，差别在于输入电压波形检测与有效值检测的参考地与驱动电源地不同。

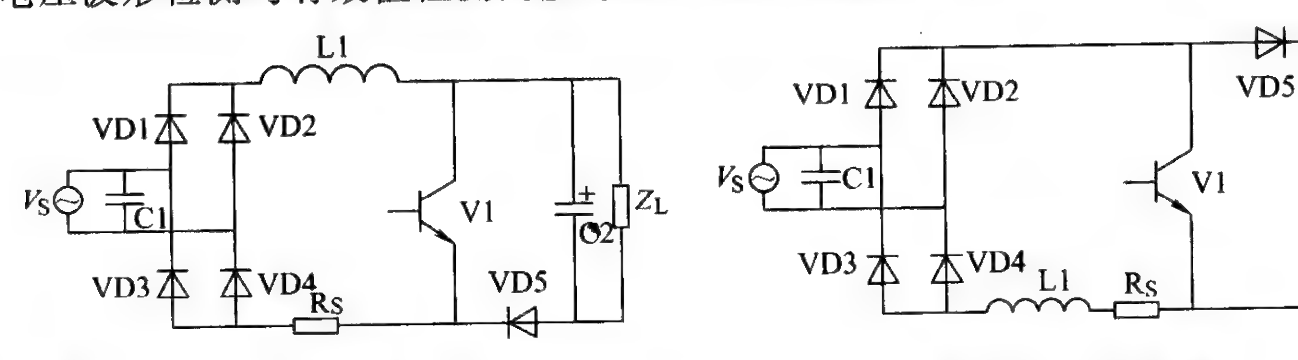


图 8-49　反向快速恢复二极管低端的单相有源 PFC 拓扑结构

图 8-50　升压电感低端的单相有源 PFC 拓扑结构

（3）反向快速恢复二极管与升压电感均置于低端的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-51 所示，差别在于功率开关管 V1 的驱动电源地、电解电容后级地、输入电压波形检测与有效值检测的参考地不同。

（4）反向快速恢复二极管低端与升压电感前置的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-52 所示，差别在于输入电压波形检测与有效值检测方式不同。

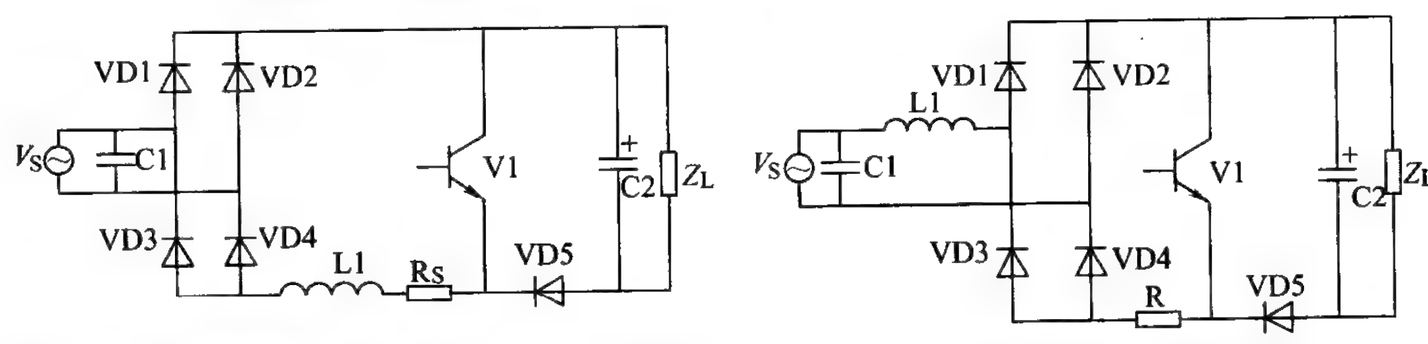


图 8-51　反向快速恢复二极管与升压电感低端的单相有源 PFC 拓扑结构

图 8-52　反向快速恢复二极管低端与升压电感前置的单相有源 PFC 拓扑结构

(5) 升压电感前置的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-53 所示，差别在于输入电压波形检测与有效值检测方式不同。

(6) 双重并联交错的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-54 所示，存在几种不同的驱动方式。

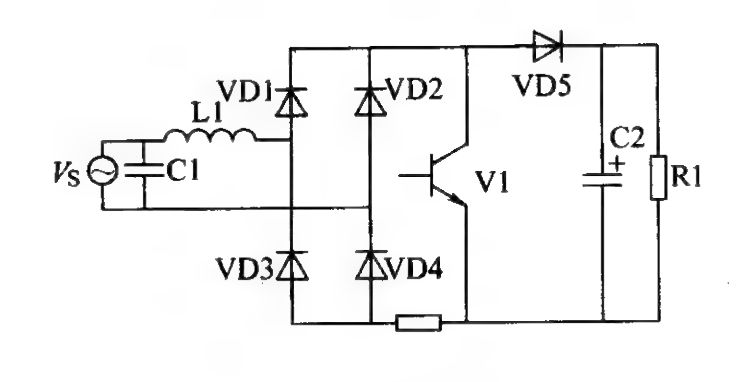


图 8-53　升压电感前置的单相有源 PFC 拓扑结构

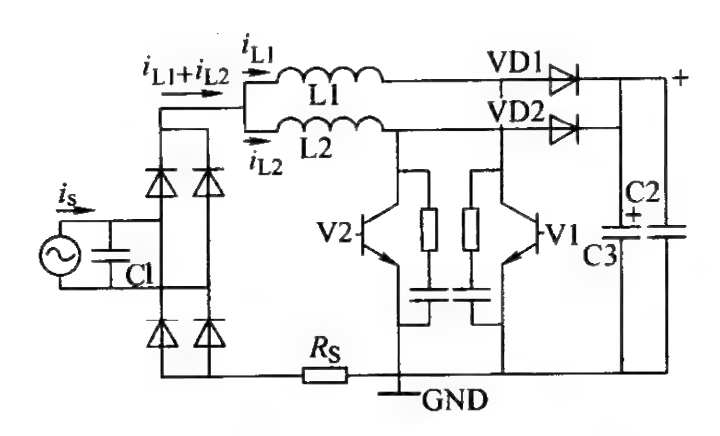


图 8-54　双重并联交错的单相有源 PFC 拓扑结构

(7) 单臂半控桥的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-55 所示，差别在于输入电压波形检测与有效值检测、电感电流检测、独立电源的路数等不同。

(8) 低端半控桥的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-56 所示，差别在于输入电压波形检测与有效值检测、独立电源的路数等不同。

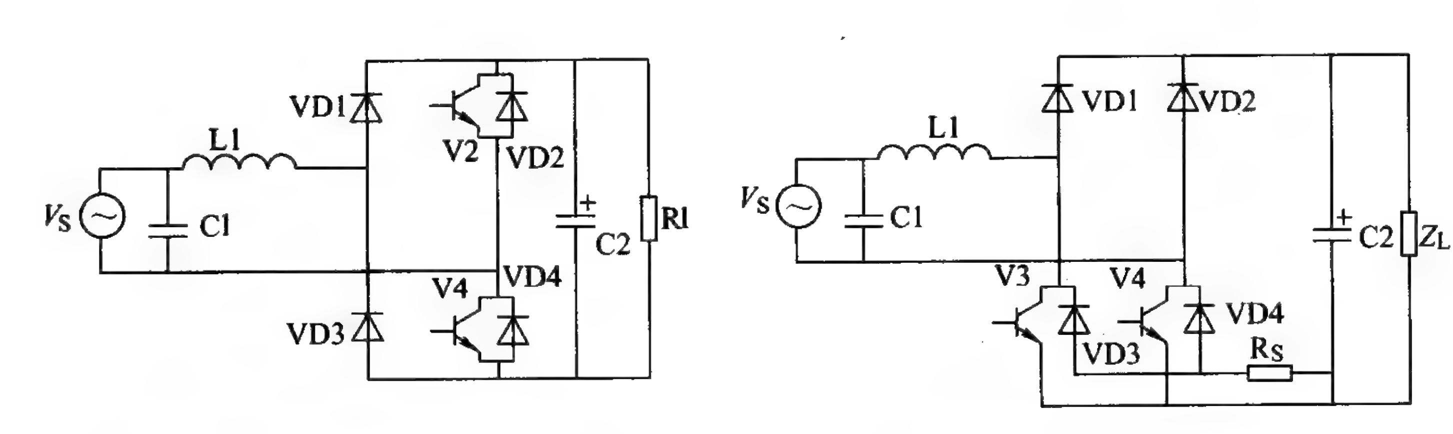


图 8-55　单臂半控桥的单相有源 PFC 拓扑结构

图 8-56　低端半控桥的单相有源 PFC 拓扑结构

(9) 双向开关前置的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-57 所示，在输入电压波形检测与有效值检测、电感电流检测、独立电源的路数等不同。

(10) 单向开关前置的单相有源 PFC 拓扑结构如图 8-58 所示，差别在于输入电压波形检测与有效值检测、电感电流检测等不同。

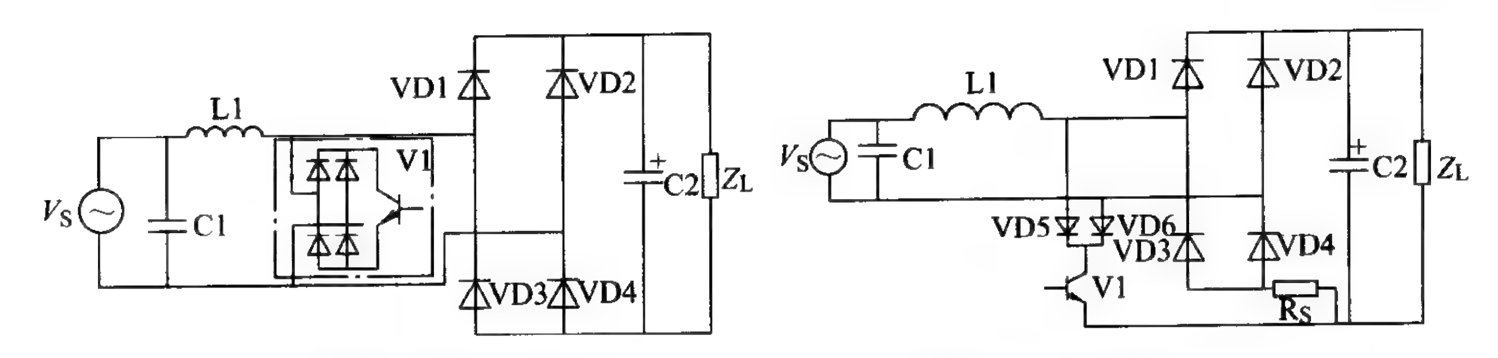


图 8-57 双向开关前置的单相有源 PFC 拓扑结构

图 8-58 单向开关前置的单相有源 PFC 拓扑结构

8.4.2 传统单相有源功率因数校正电路

8.4.2.1 传统单相有源 PFC 电路的工作原理

参考图 8-47 和图 8-48 所示的传统单相有源 PFC 的拓扑与原理，以 L4981B 专用控制芯片为例简述单相有源 PFC 的工作过程，单相有源 PFC-变频器-电动机系统的原理如图 8-59 所示。

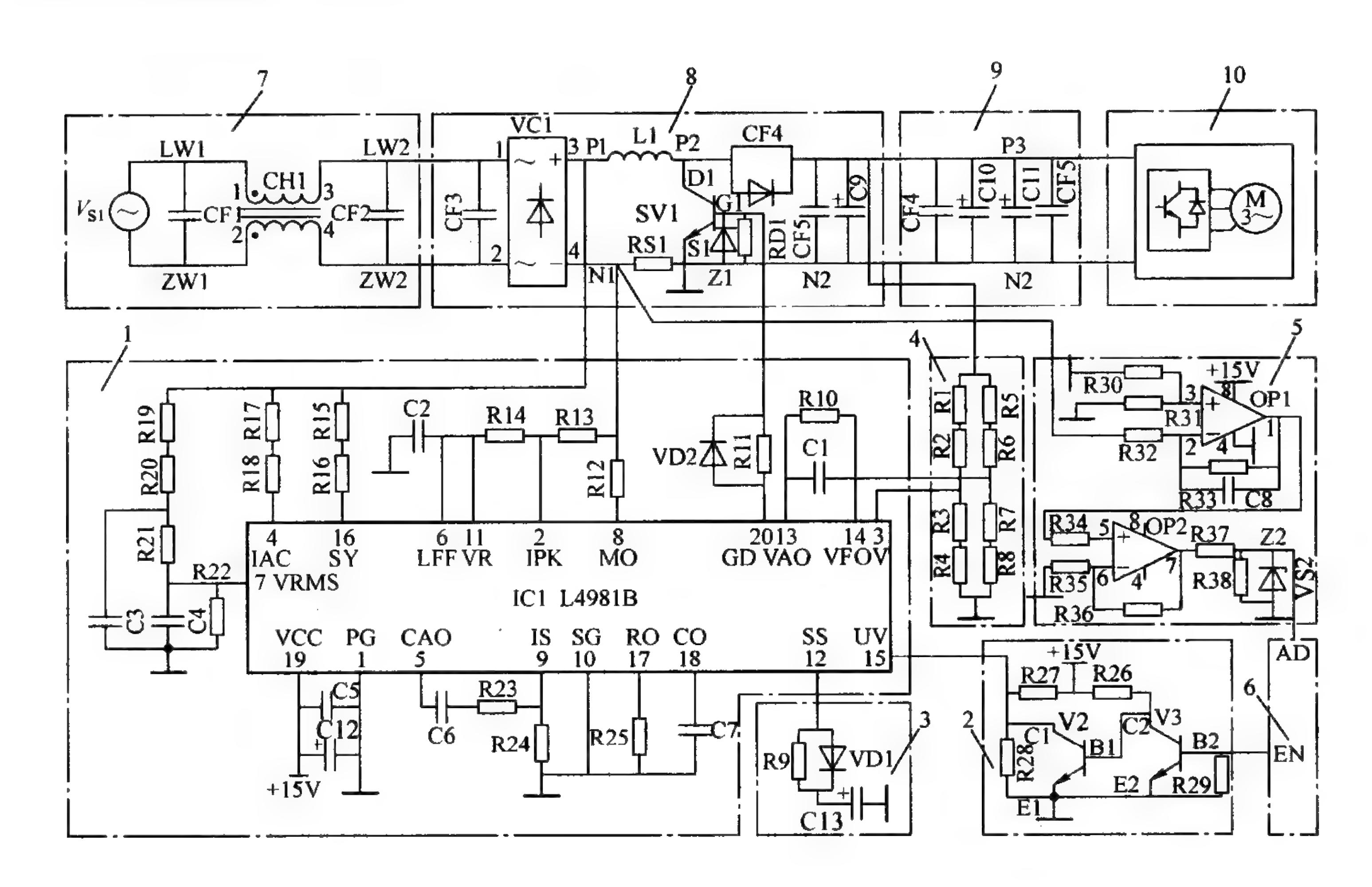


图 8-59 基于 L4981B 的单相有源 PFC-变频器-电动机系统

1—校正电路 2—起停电路 3—软起动电路 4—检压电路

5—检流电路 6—外控电路 7—交流电路 8—功率电路

9—储能电路 10—变频电路

图 8-59 中，起停电路 2 负责起动或停止 PFC 工作，输入高电平起动，低电平停止。软起动电路 3 负责设定软起动时间长度。检流电路 5 负责通过检测分流电阻 RS1 的电压来间接反映电网电流，经过低通滤波和放大后送入外控电路。下面主要描述一下校正电路 1 的原理。

校正电路 1 主要由 L4981B 及其周围控制电路组成。其中 L4981B 的信号地为 10 脚，电源地为 1 脚，信号地与电源地均与 N1 相连。电源为 19 脚，额定电压为直流 +15V；电源欠电压检测为 15 脚；开关频率调制环节由电阻 R15 与 R16 组成；交流电压波形检测环节由电阻 R17 和 R18 组成；交流电压有效值环节由电阻 R19 ~ R22、电容 C3 ~ C4 组成，为一个二阶滤波网络；驱动环节由电阻 R11 与二极管 VD2 组成；峰值电流检测环节由 R12、R13、R14 组成，C2 起到滤波作用；振荡环节由 R25 和 C7 组成，负责产生锯齿波，决定开关频率；电流 PI 调节环节由电阻 R23、R24、C6 与 L4981B 内部放大器一起构成；电压低通滤波器由电阻 R10 与 C1 与 L4981B 内部放大器一起构成，调压反馈环节由 14 脚引入电压信号，由电阻 R5 ~ R8 组成分压网络，来实现电压调节；过电压网络由电阻 R1 ~ R4 组成，来实现过电压保护；功率电路 8 主要由整流桥、功率开关、分流电阻与直流滤波环节组成。

单相有源 PFC 系统电路的工作原理描述如下：在交流电路 7 的正负半周，接收来自校正电路 1 的驱动信号作用在 SW1 的控制极 G1 后，SW1 导通，PS1 在电感 L1 作用下短路，L1 的电流上升，储存电能。SW1 关断时，L1 感应高压，将部分存储的能量通过 FRD1 释放到储能电路 9 中。如此反复进行，在储能电路 9 中获得一个纹波电压满足要求的直流电压，供变频电路 10 使用，而变频电路 10 在控制电路 6 的控制下，产生三相 PWM 线电压供感应电动机传动使用，驱动负载压缩机工作。同时使交流电路 7 的输入电流波形为正弦波形，而且与输入电压同步，实现接近于 1 的输入功率因数。

8.4.2.2 传统单相有源 PFC 电路的仿真分析

基于图 8-47 和图 8-59，建立传统单相有源 PFC 技术 SIMULINK 6.0 的仿真电路，如图 8-60 所示。其中解算选项为：变步长，最大步长为 1e-6s，相对精度为 1e-3，算法选择 ode23t（mod. Stiff/trapezoidal），其他选项选择缺省值。

功率电路介绍：图中 VS1 为标准单相正弦电压源，电压有效值为 220V。RLC1 为输入滤波电容，取值 3.3μF，为了便于仿真收敛，串联 0.01Ω 的电阻。RLC2 为升压电感，取值为 1mH。RLC3 为桥后直流侧并联电阻，取值为 51kΩ。RLC4 为功率级无感电阻，取值为 0.015Ω，负责检测电感电流瞬时值。RLC6 为电解电容，容值为 1410μF。RLC6 为电阻负载，取值为 50Ω。RLC7 与 RLC8 为分压电阻，构成 1:80 的比例，提供电压反馈信号，对应空载输出直流电压为 400V，RLC7 取值为 79kΩ，RLC8 取值为 1kΩ。D1 ~ D4 构成单相整流桥，也可

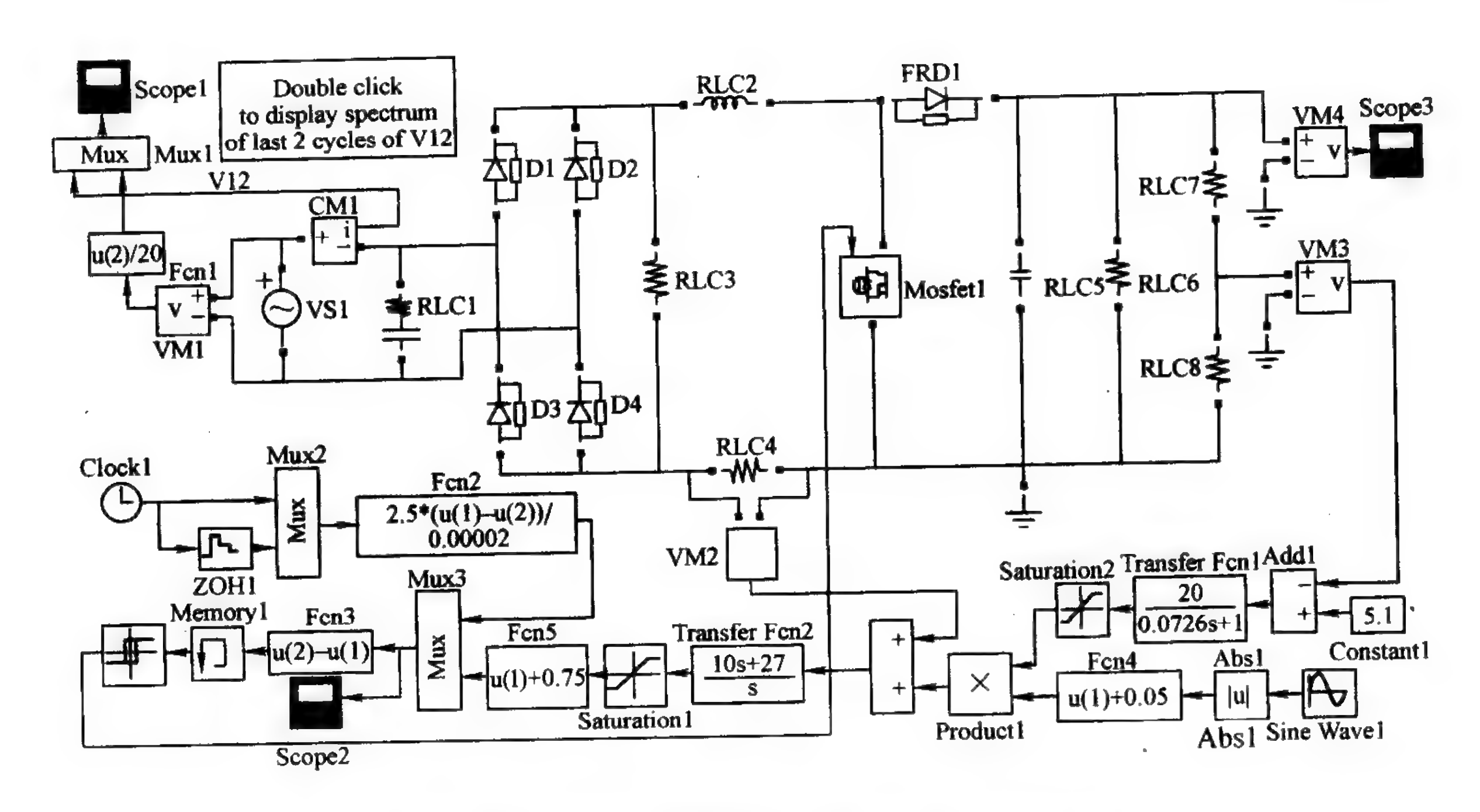


图 8-60　传统单相有源 PFC 系统的仿真电路

以采用通用单相整流桥。MOSFET1 为功率开关，FRD1 为反向快恢复功率二极管。

控制电路介绍：三角波发生电路由时钟 Clock1、采样保持器 ZOH1、复合器 Mux2 以及通用表达式 Fcn3 构成，采样时间为 0.00002s，得到开关频率为 50kHz、幅值为 2.5 的锯齿波。电压滤波器由常数 Constant1、加法器 Add1、传递函数 Transfer Fcn1、饱和器 Satuation2 组成，完成对负载电压的检测与给定电压的比较、滤波和放大，饱和上限为 + 15V，下限为 − 15V。输入交流电压波形检测部分由正弦波发生器 Sine Wave1、求绝对值器 Abs1、通用表达式 Fcn4 组成，其中 Sine Wave1 的幅值为 0.05V，与电源 VS1 波形和相位完全一直，Fcn4 负责补偿过零失真。上述两者结果经过乘法器 Product1 相乘后的乘积为输入参考电流信号，与电压表 VM2 检测得到的电感电流信号相比较作为电流 PI 调节器的输入。电流 PI 调节器由传递函数 Transfer Fcn2、饱和器 Satuation2、通用表达式 Fcn5 组成，Fcn5 负责改善输入电流波形，得到的结果通过 Mux3 复合和通用表达式 Fcn3 与锯齿波相比较得到 PWM 脉冲，驱动 Mosfet1 开通与关断。相关仿真选择参数如图 8-60 所示。

仿真结果如下：系统进入稳态后，Scope1 给出了输入电压与输入电流波形，如图 8-61 所示，其中输入电压幅值缩减了 20 倍。可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。Scope3 给出了输出直流电压波形，如图 8-62 所示，其中直流平均电压为 400V，纹波电压的最大峰峰值为 20V。Scope2 反映了锯齿波与最终控制信号波形，如图 8-63 所示。输入电流波形与频

谱，如图 8-64 所示，可见输入电流幅值为 21.7A，输入功率接近 3.4kW。

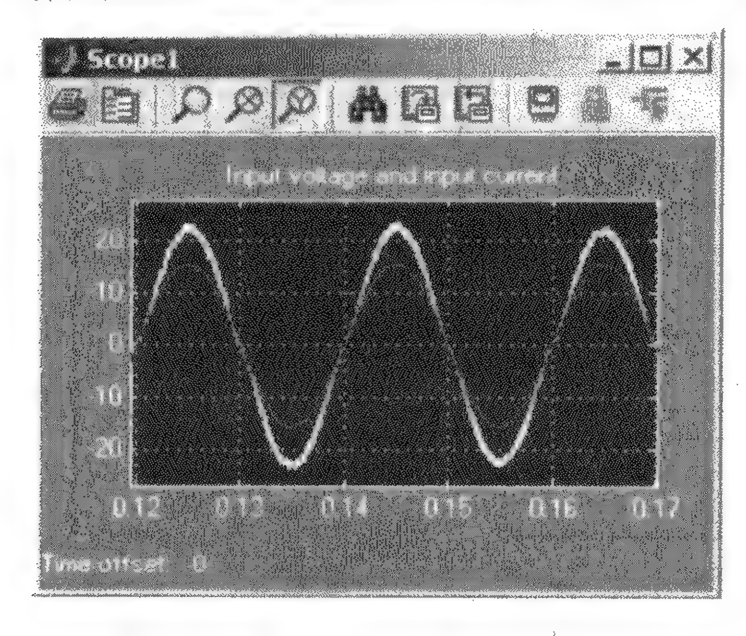


图 8-61　输入电压与输入电流波形

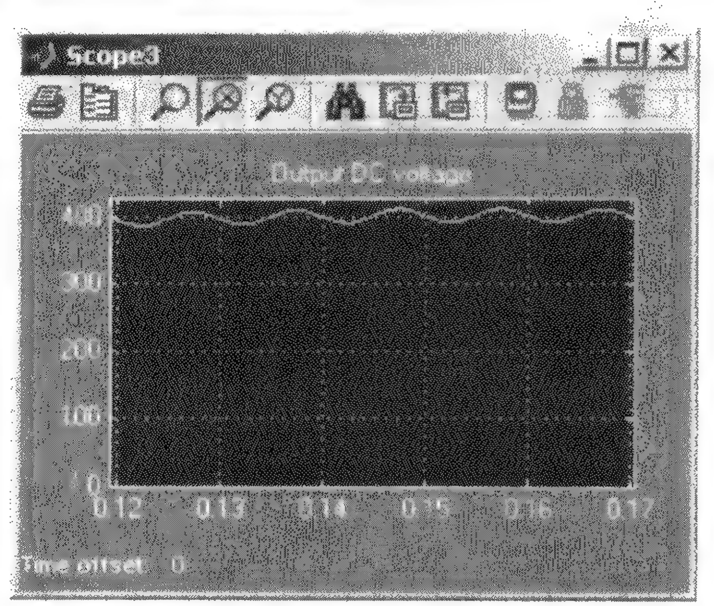


图 8-62　输出直流电压波形

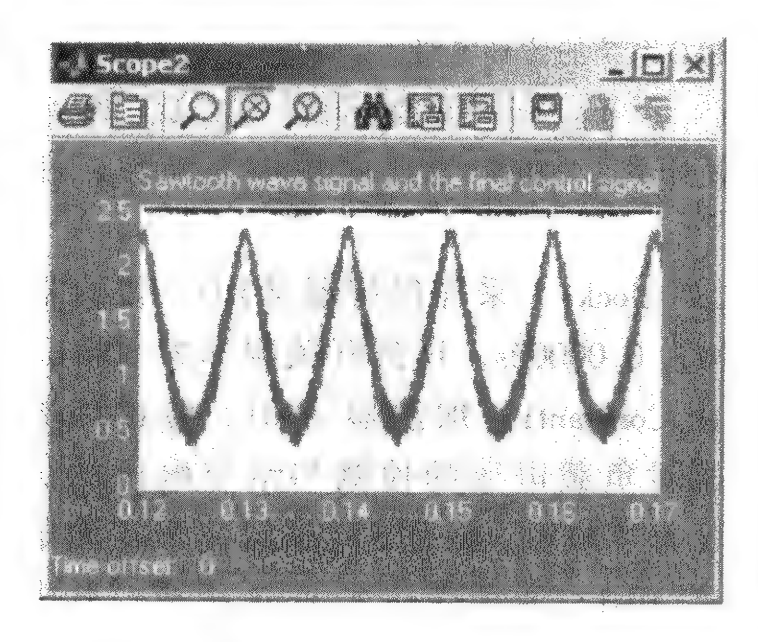


图 8-63　锯齿波与最终控制信号波形

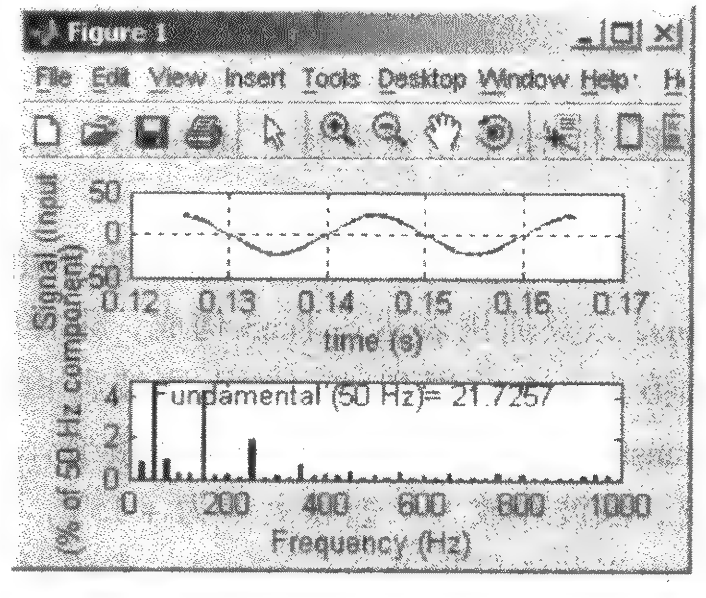


图 8-64　输入电流波形及其频谱

8.4.3　其他单相有源 PFC 的仿真分析

8.4.3.1　低端半控桥的单相有源 PFC 电路

基于图 8-56，建立低端半控桥的单相有源 PFC 的 SIMULINK 6.0 的仿真电路，如图 8-65 所示。功率电路部分包括二极管 D1 ~ D2 、功率 Mosfet1 ~ 2、反向快恢复二极管 FRD1 ~ 2 构成低端半控桥。控制部分解算选项为：变步长，最大步长为 1e－6s，相对精度为 1e－3，算法选择 ode23t（Stiff/trapezoidal）。其他部分解释说明可参照图 8-60。

仿真结果如下：系统进入稳态后，Scope1 给出了输入电压与输入电流波形，如图 8-66 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的要求。Scope3 给出了输出直流电压波形，如图 8-67 所示，其中直流平均电压

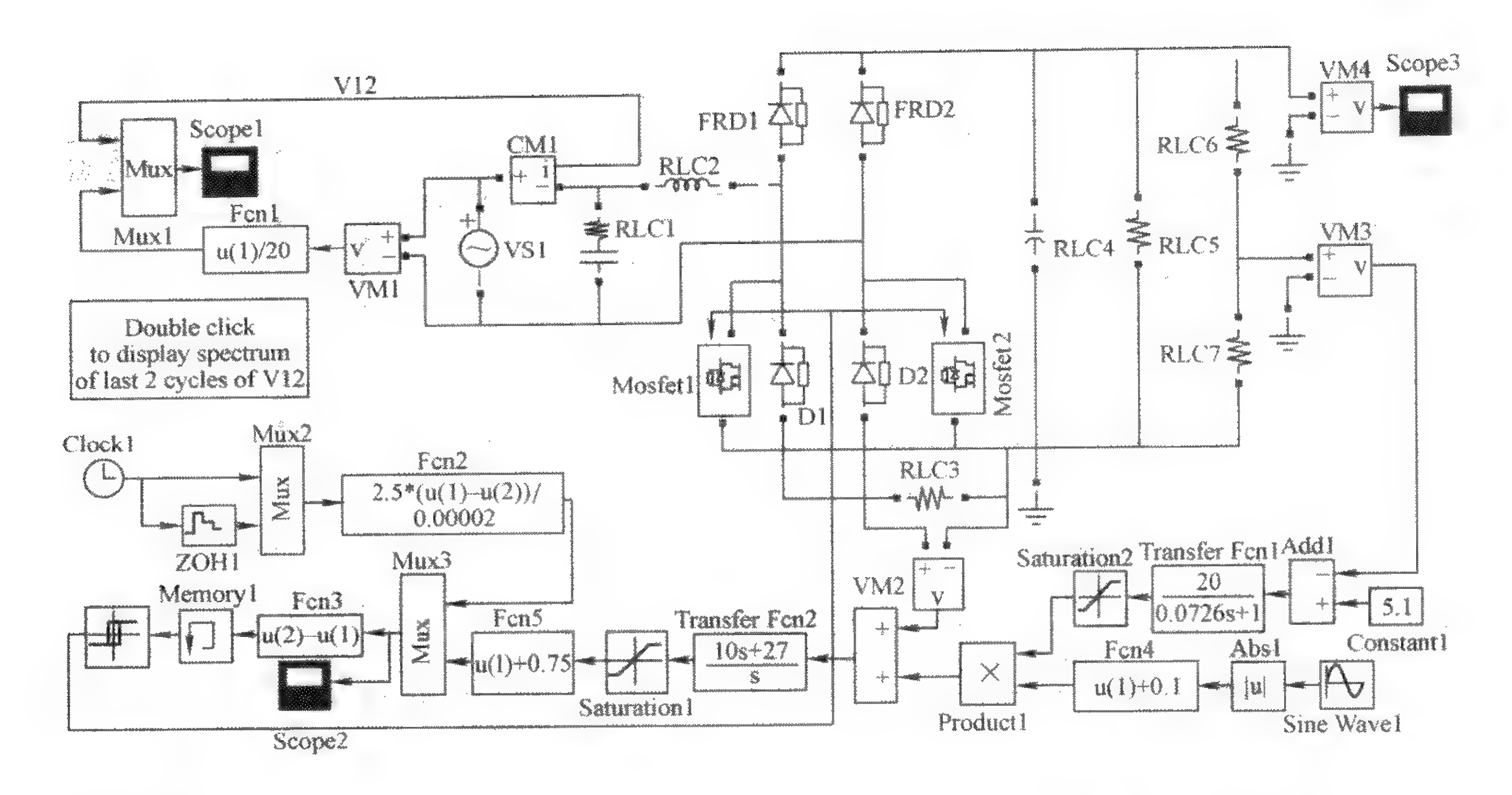


图 8-65　低端半控桥的单相有源 PFC 的仿真电路

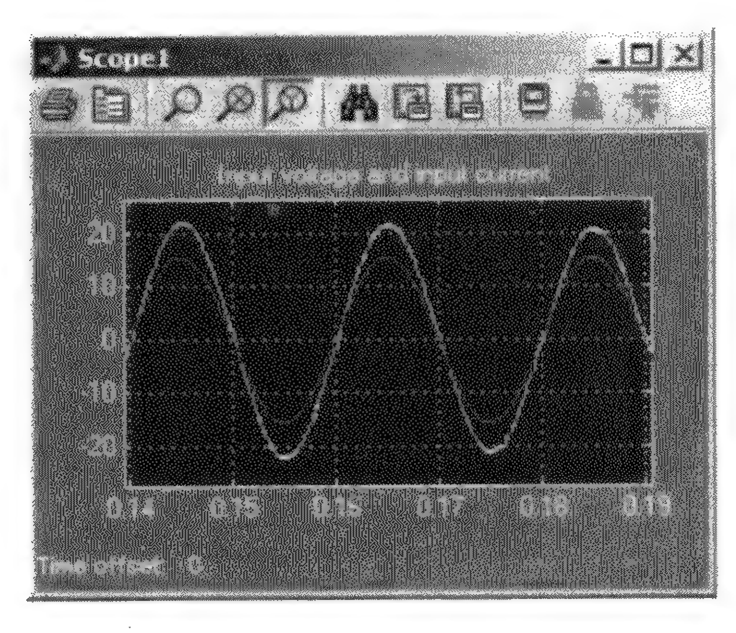


图 8-66　输入电压与输入电流波形

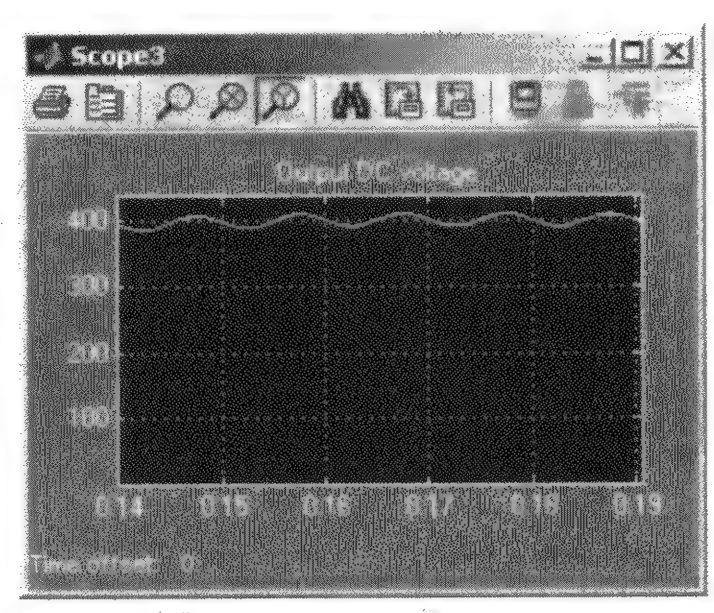


图 8-67　输出直流电压波形

为 400V，纹波电压的最大峰峰值为 20V。

8.4.3.2　双向开关前置的单相有源 PFC 电路

基于图 8-57，建立双向开关前置的单相有源 PFC 的 SIMULINK 6.0 的仿真电路，如图 8-68 所示，进行仿真，有关结果与图 8-60 所示的传统单相有源 PFC 系统仿真电路结果相同，不再提供。

8.4.3.3　单向开关前置的单相有源 PFC 电路

基于图 8-58，建立单向开关前置的单相有源 PFC 的 SIMULINK 6.0 的仿真电路，如图 8-69 所示，进行仿真，有关结果与图 8-60 所示的传统单相有源 PFC 系统仿真电路结果相同，不再提供。

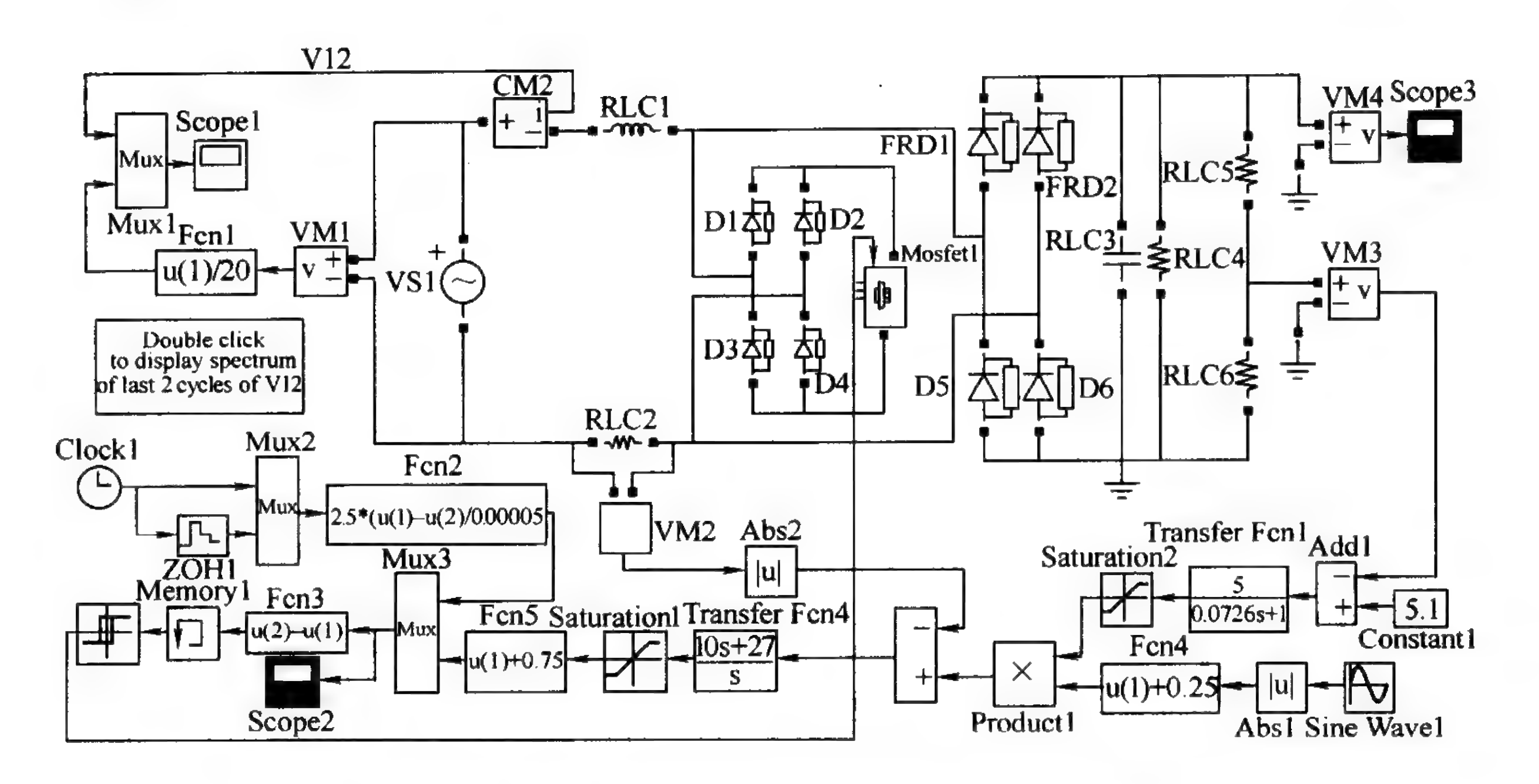


图 8-68 双向开关前置的单相有源 PFC 的仿真电路

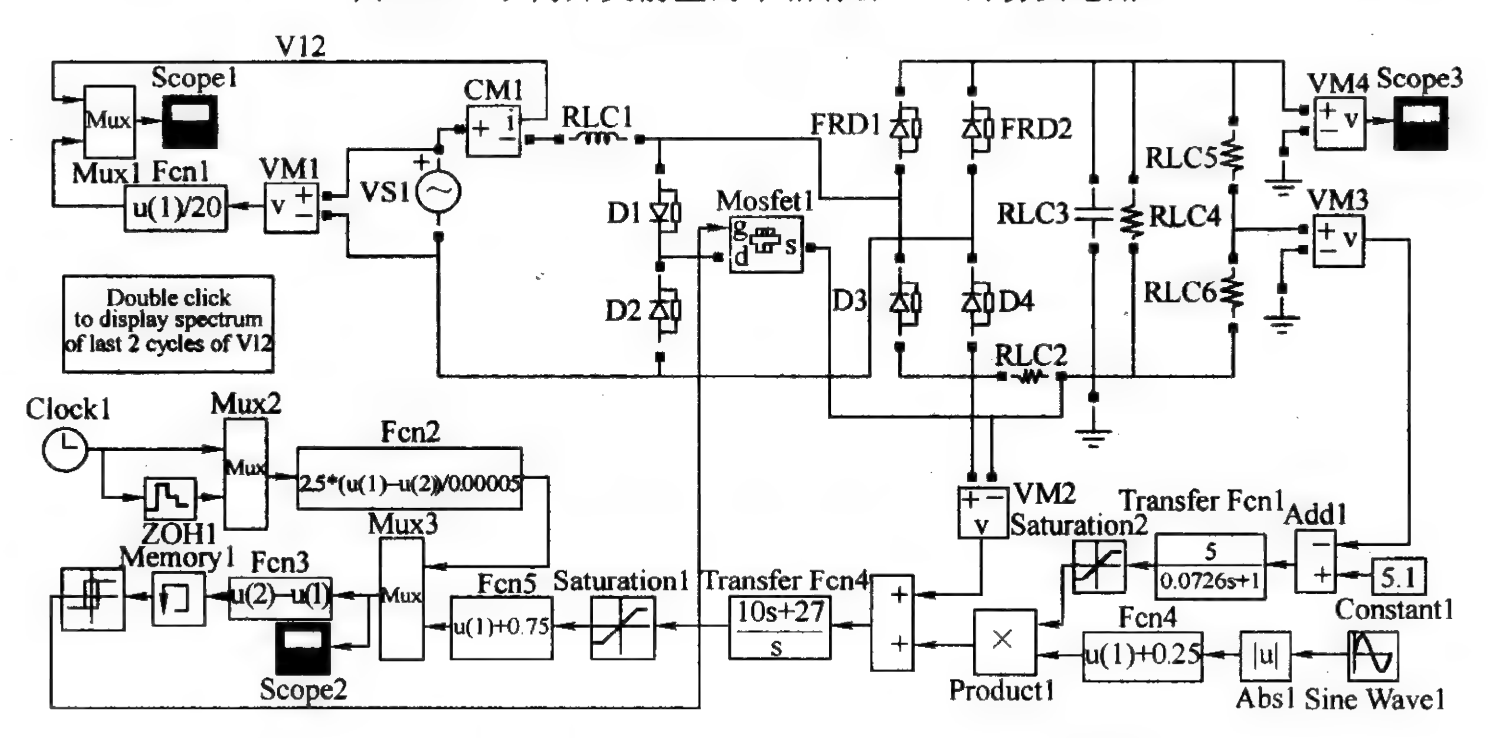


图 8-69 单向开关前置的单相有源 PFC 的仿真电路

8.5 有源电力滤波器与单位功率因数可控整流器

有源电力滤波器（active power filter）属于灵活交流输电系统（FACTS）和用户电力（DFACTS）中的一种装置，分为并联型和串联型，并联型 APF 适用于谐波电流源型非线性负载，串联型适用于谐波电压型非线性负载。并联型 APF 可以单独使用或与 LC 滤波器混合使用，具有如下特点：①只需要电力系统提供一

个接入点；②不会改变系统的原有结构；③等效为向电网注入谐波或无功电流源，不增加电力系统的复杂程度；④接入点的短路容量相对较弱，适合于补偿电流，对电压补偿能力相对较弱等。有源电力滤波器等并联补偿装置能够提高电网的安全稳定性、供电可靠性和运行效率和电能质量。当有源电力滤波器所补偿非线性负载的谐波或无功电流为零时，本身就是一个可控整流器，因此，本文在简述电压型并联有源电力滤波器基本工作原理的基础上，对三相三线制的 APF 和可控整流器进行重点仿真分析。

8.5.1 并联型 APF 与电压源型可控整流器的电路型式

从输入相数上来看，有源电力滤波器分为单相有源电力滤波器和三相有源电力滤波器，其功率电路拓扑结构分别如图 8-70 和图 8-71 所示，当不连接非线性负载时有源电力滤波器如果输出带负载时就等效于可控整流器，其中单相可控整流器拓扑结构如图 8-72 所示，三相可控整流器拓扑结构如图 8-73 所示。

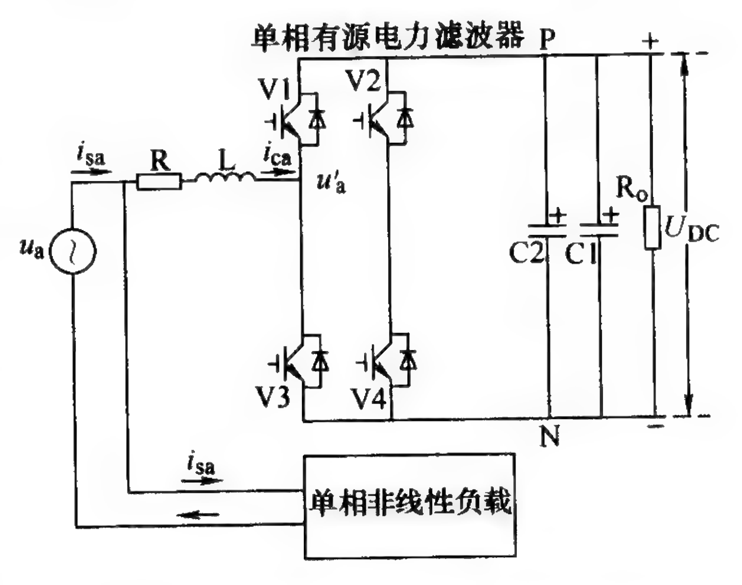


图 8-70 单相有源电力滤波器拓扑结构

非线性负载一般是指输入电压与输入电流波形不一致的一类负载，如输入级为单相或三相整流器的变换器系统。这类负载向电网注入有功电流、无功电流和谐波电流，有源电力滤波器的作用就是向电网产生相位相反的无功电流和/或谐波电流，抵消非线性负载产生的无功电流和/或谐波电流，消除谐波电流污染，提高接入点附近的功率因数。

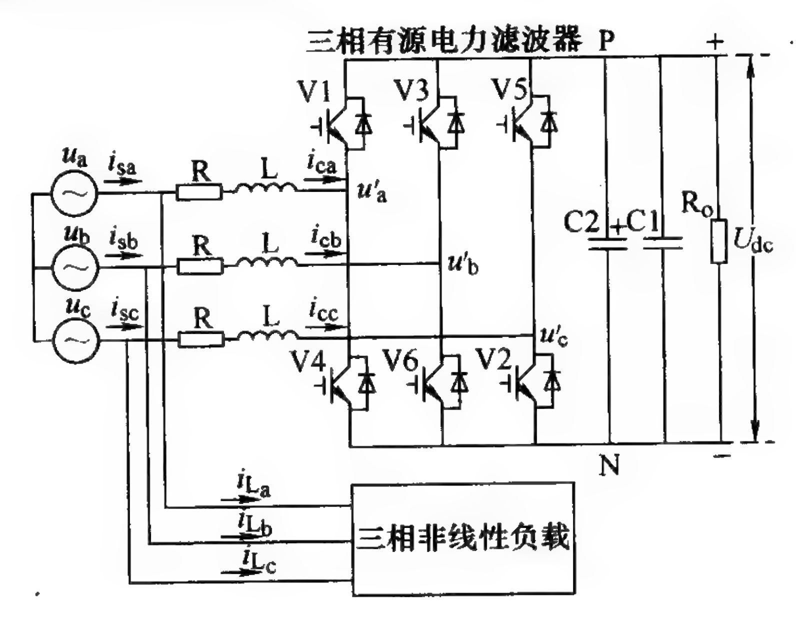


图 8-71 三相有源电力滤波器拓扑结构

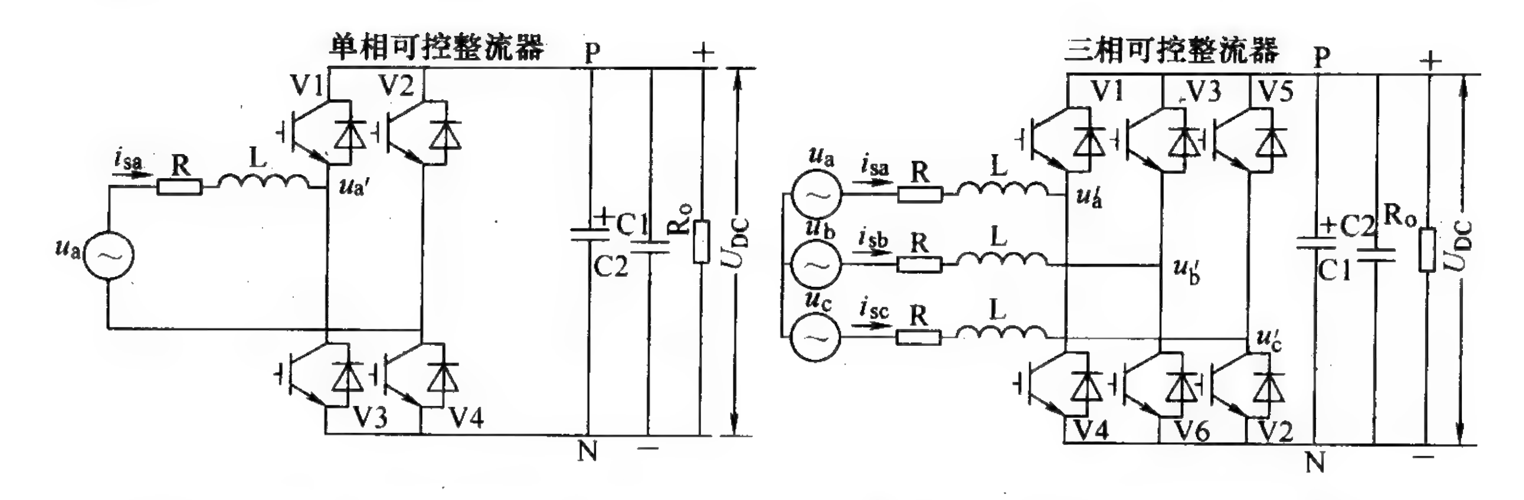


图 8-72　单相可控整流器拓扑结构　　　　图 8-73　三相可控整流器拓扑结构

8.5.2　并联型有源电力滤波器技术

8.5.2.1　并联型有源电力滤波器的工作原理

有源电力滤波器技术发展迅速，具有多种控制策略，如基于瞬时功率理论的控制策略（IPT），同步功率传输的控制策略（SPF），单位功率因数的控制策略（UPF），功率因数任意可控的控制策略（PFRC），其中 UPF 算法的目标是在 APF 接入点处获得单位功率因数，既要补偿非线性负载的谐波电流，又要补偿其无功电流，获得整体上的单位输入功率因数，其容量比单纯补偿谐波电流时要大，本文基于 UPF 算法对并联型有源电力滤波器进行理论简述和仿真分析。

UPF 控制策略的基本实现原理与传统单相有源功率因数校正原理相似，其中三相有源电力滤波器的工作原理如图 8-74 所示，单相有源电力滤波器的工作原理如图 8-75 所示。

在图 8-74 中，U_{DC}为三相有源电力滤波器直流回路电压测量值，U_{DC}^*为直流回路电压给定值，两者之差经过具有低通滤波功能的误差放大器后得到电压控制量。该电压控制量经过与各输入相电压的参考信号 U_a、U_b 与 U_c 相乘后，得到各相的输入电流给定信号 i_{sa}^*、i_{sb}^*和 i_{sc}^*，该给定信号与各相实际电流信号 i_{sa}、i_{sb}和 i_{sc}相比较后经过各自 PI 调节器，得到最终的体现有输出电压调节和输入电流调节的综合控制信号，经过电压比较器后得到 6 路 PWM 信号，经过隔离和放大后驱动对应功率器件工作。

在图 8-75 所示的单相有源电力滤波器的工作原理与图 8-74 相似，区别是①电流 PI 调节器的结果加入了输入电压补偿量；②为了构造 4 路 PWM 脉冲，增加了最终控制信号求反环节。显然，当有源电力滤波器可以作为可控整流器使用，而其基本算法可以保持不变，当然也可以采用其他控制算法。类似单相有源 PFC，有源电力滤波器输出直流电压一般要大于输入交流相电压幅值的 2～3 倍，否则控制效果和经济性较差，其输入电感 L 同时起到储能和滤波作用。

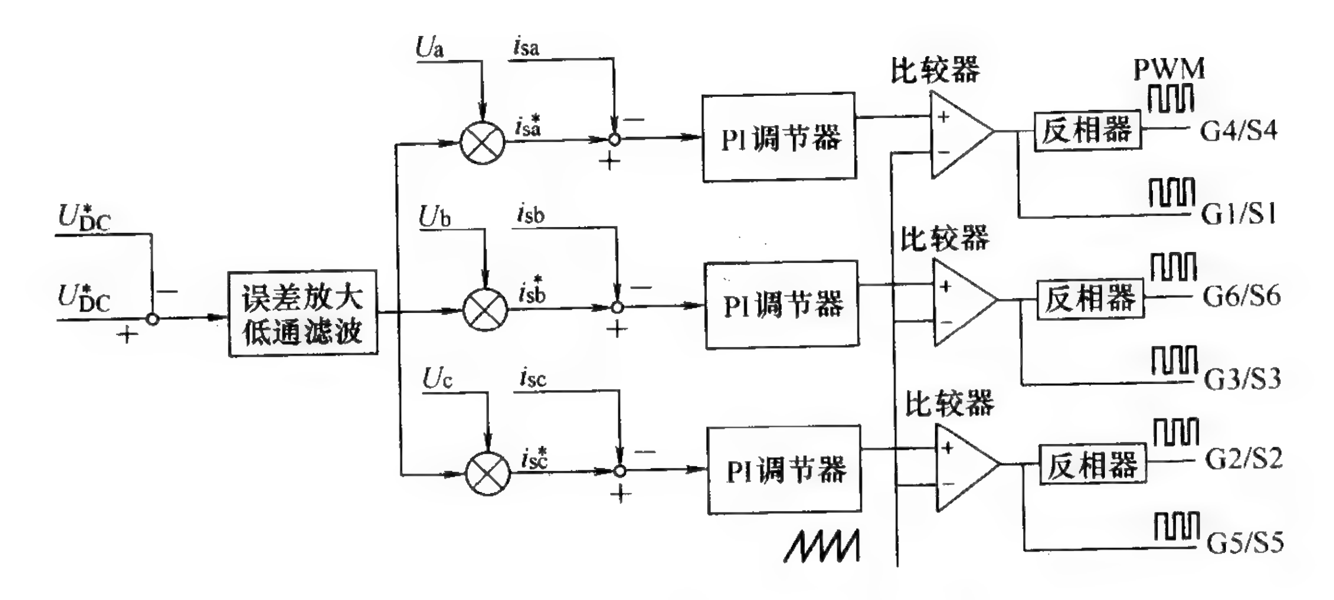


图 8-74　三相有源电力滤波器的工作原理

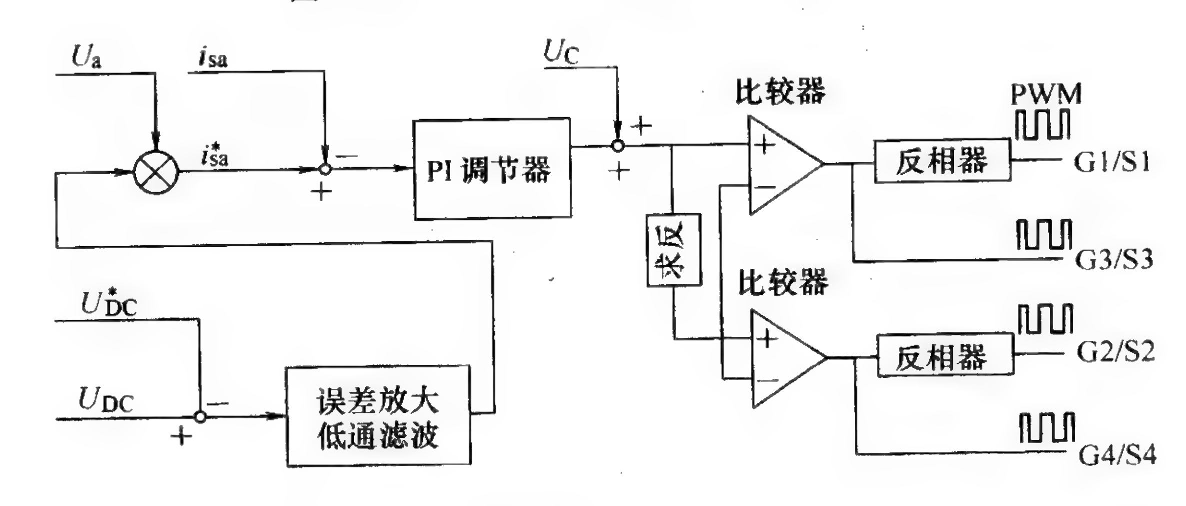


图 8-75　单相有源电力滤波器的工作原理

8.5.2.2　单相并联型有源电力滤波器的仿真分析

基于图 8-70 和图 8-75，建立单相有源电力滤波器 SIMULINK 6.0 的仿真电路，如图 8-76 所示。其中解算选项为：变步长，最大步长为 1e - 6s，相对精度为 1e - 3，算法选择 ode23tb stiff/TR-BDF2，其他选项选择缺省值。

功率电路介绍：整个电路由单相 APF 和单相非线性负载组成，其中二极管 D5 ~ D8、电感 RLC6、电容 RLC7 和电阻 RLC8 构成了单相非线性负载，电感 RLC6 取值为 10mH、电容 RLC7 取值为 1410μF，电阻 RLC8 取值为 100Ω。而检测电流用电阻 RLC1、滤波电感 RLC2 和 RLC3、二极管 D1 ~ D4、功率开关 S1 ~ S4、电解电容 RLC4 和假负载电阻 RLC5 构成了单相 APF。电阻 RLC1 取值为 0.02Ω、滤波电感 RLC2 和 RLC3 取值为 5mH、电解电容 RLC4 取值为 1410μF，电阻 RLC5 取值为 10kΩ。VS1 为标准单相正弦电压源，电压有效值为 220V。

控制电路介绍：Sine Wave1 为参考输入电压，与单相电源完全一致，幅值为 2V。Step1 为阶跃信号，阶跃时刻为 0.02s，用于延时启动控制电路。Repeating Sequence 为频率 20kHz、幅值 0 ~ 1 的锯齿波发生器，也可以构造相似的三角波发生器代替锯齿波发生器。控制电路的其他部分参考图 8-76。

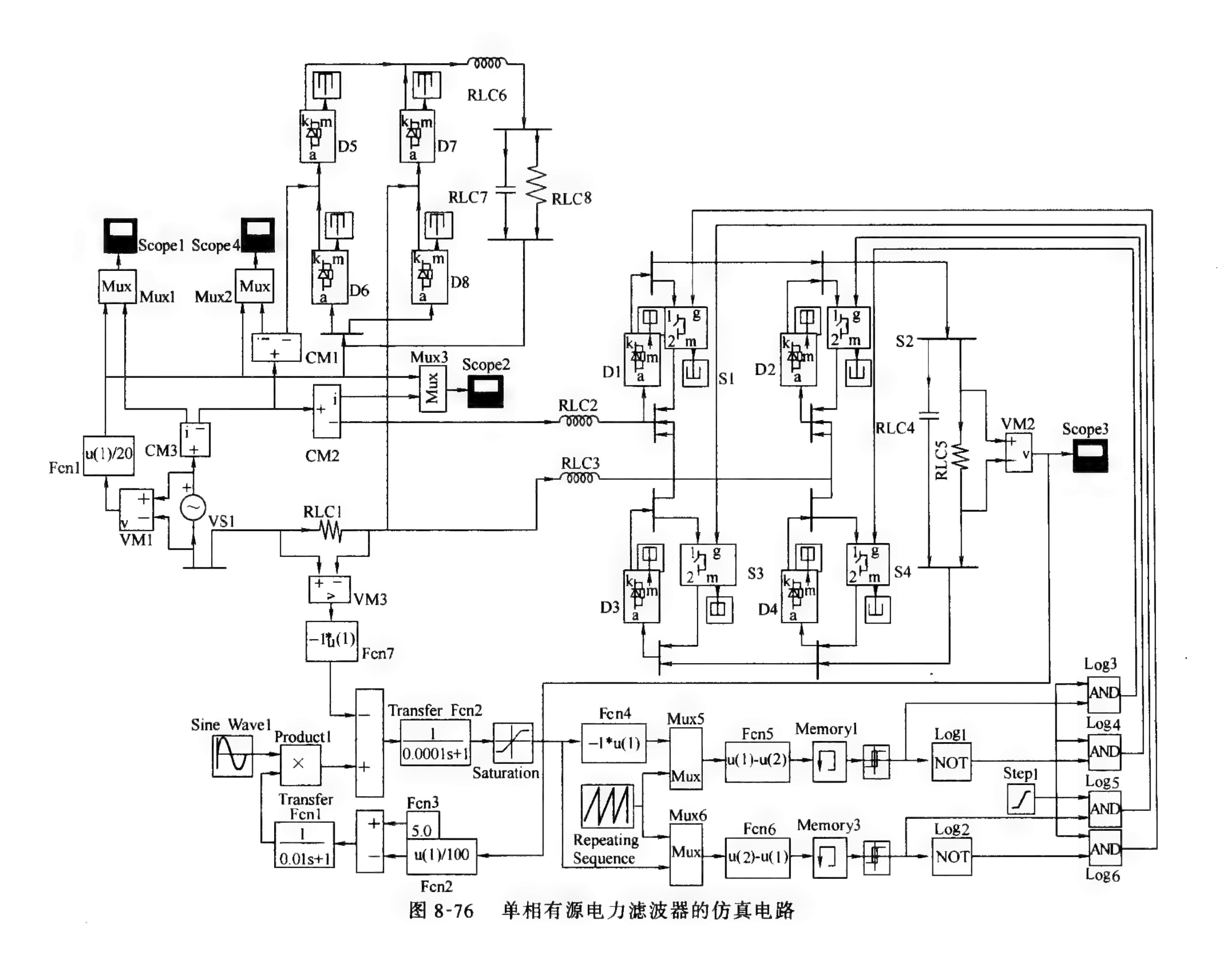


图 8-76　单相有源电力滤波器的仿真电路

仿真结果如下：系统进入稳态后，Scope1 给出了补偿后电源输入电压与输入电流波形，如图 8-77 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。Scope3 给出了单相 APF 的输出直流电压波形，如图 8-78 所示，其中直流平均电压为 525V，纹波电压峰峰值为 4V。Scope4 给出了非线性负载输入电压与输入电流波形，如图 8-79 所示。Scope2 给出了单相 APF 的输入电压与输入电流波形，如图 8-80 所示。

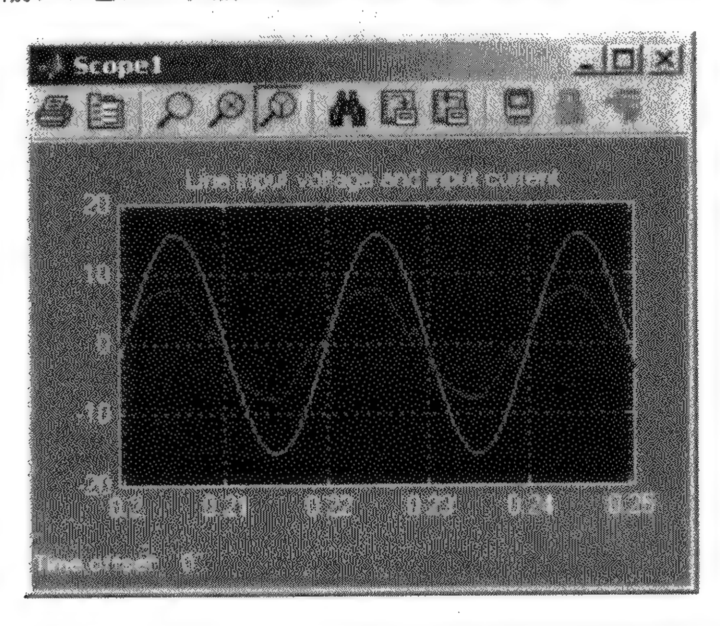


图 8-77　补偿后输入电压与输入电流波形

图 8-78　单相 APF 输出直流电压波形

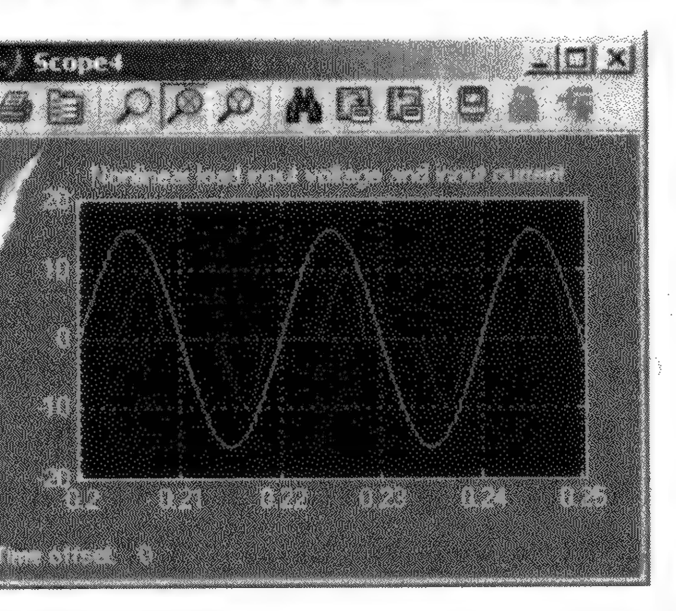


图 8-79　非线性负载输入电压与输入电流波形

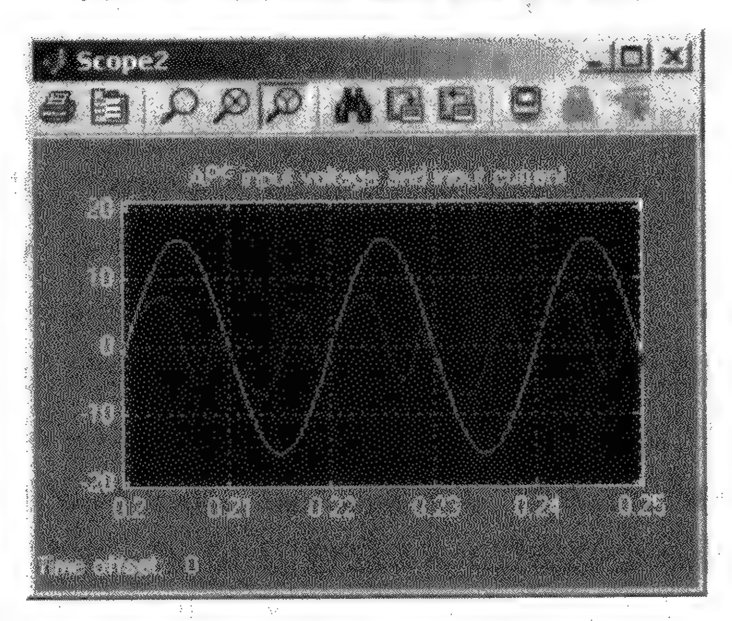


图 8-80　单相 APF 输入电压与输入电流波形

8.5.3　其他并联型 APF 和整流器的仿真分析

8.5.3.1　单位功率因数的单相可控整流器

参照图 8-76 所示的单相有源电力滤波器的仿真电路，去掉非线性负载部分，就得到了单相可控整流器，仿真电路不再提供。不失一般性，使得负载电阻 RLC5 取值为 100Ω。

仿真结果如下：系统进入稳态后，Scope1 给出了电源输入电压与输入电流波形，如图 8-81 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。Scope3 给出了输出直流电压波形，如图 8-82 所示，其中直流平均电压为 521V，纹波电压峰峰值约为 10V。

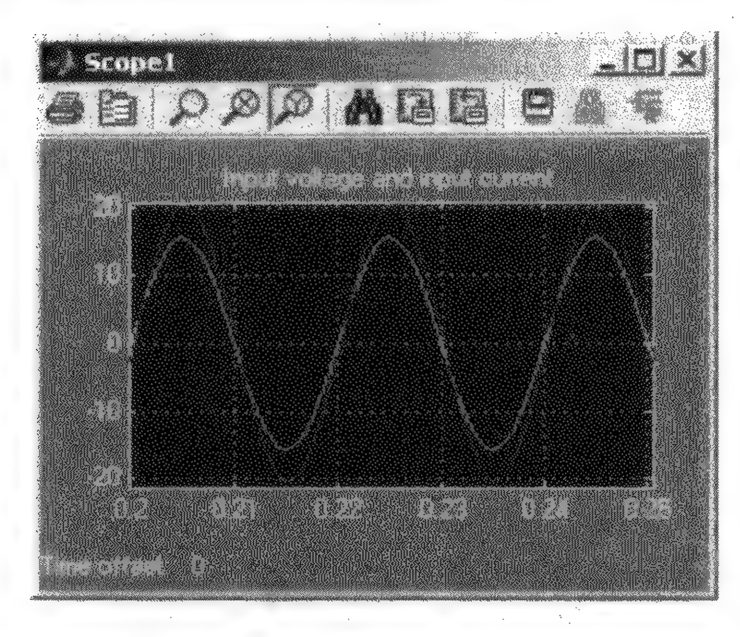



图 8-81　电源输入电压与输入电流波形

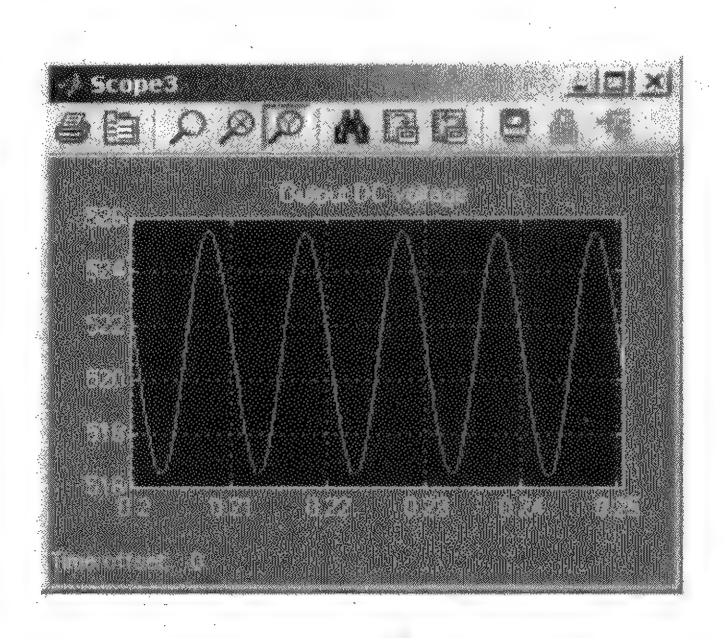


图 8-82　单相可控整流器输出直流电压（纹波）波形

8.5.3.2　单位功率因数的三相并联型 APF

基于图 8-71 和图 8-74，建立三相有源电力滤波器 SIMULINK 6.0 的仿真电路，如图 8-83 所示。其中解算选项为：变步长，最大步长为 1e－6s，相对精度为 1e－3，算法选择 ode23tb stiff/TR-BDF2，其他选项选择缺省值。

功率电路介绍：整个电路由三相 APF 和三相非线性负载组成，其中二极管 D7～D12、电感 RLC9、电容 RLC10 和电阻 RLC11 构成了三相非线性负载，电感 RLC9 取值为 10mH、电容 RLC10 取值为 20μF，电阻 RLC11 取值为 100Ω。而检测电流电阻 RLC1～3、滤波电感 RLC4～6、二极管 D1～D6、功率开关 S1～S6、电解电容 RLC7 和假负载电阻 RLC8 构成了三相 APF。电阻 RLC1～3 取值为 0.02Ω、滤波电感 RLC1～3 取值为 10mH、电解电容 RLC4 取值为 2500μF，电阻 RLC5 取值为 10kΩ。VS1～3 为标准三相正弦电压源，相电压有效值为 220Vrms。

控制电路介绍参考单相有源滤波器的仿真电路。

仿真结果为：系统进入稳态后，Scope1 给出了补偿后电源 VS1 输入相电压与输入电流波形，如图 8-84 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。Scope3 给出了三相 APF 的输出直流电压波形，如图 8-85 所示，其中直流平均电压为 703.6V，纹波电压的最大峰峰值为 1V。Scope4 给出了非线性负载输入电流与输入电压波形，如图 8-86 所示。Scope2 给出了三相 APF 输入电压与输入电流波形，如图 8-87 所示。

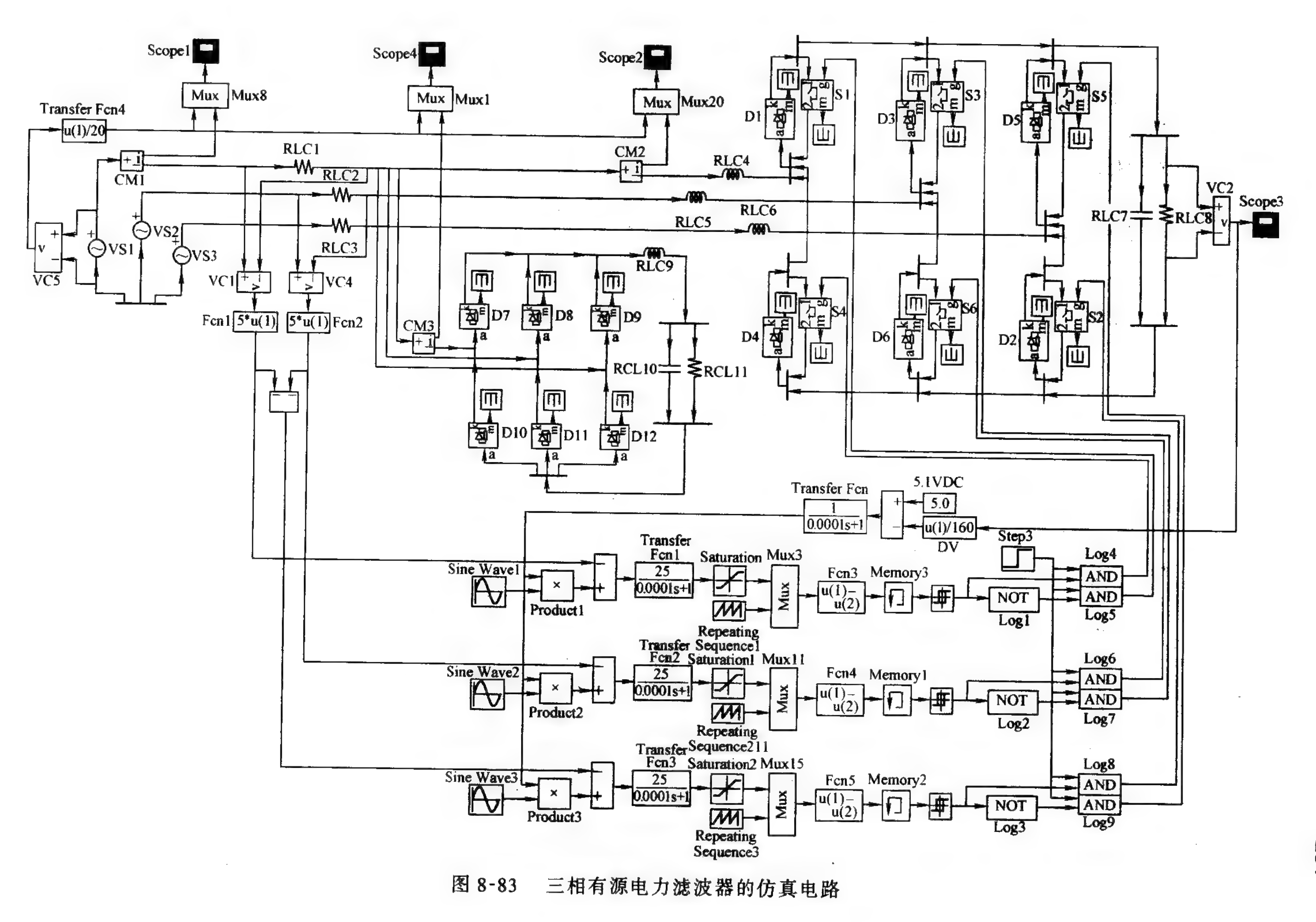


图 8-83　三相有源电力滤波器的仿真电路

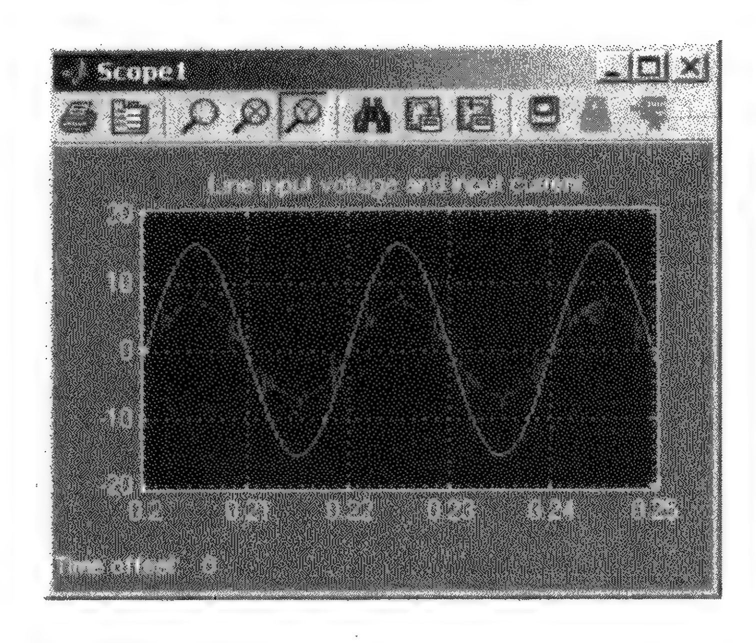


图 8-84 补偿后电源输入电压与输入电流波形

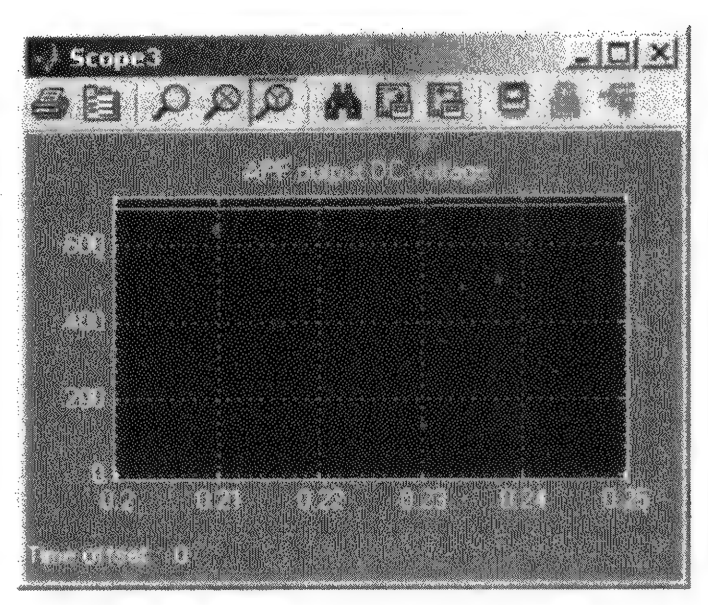


图 8-85 单相 APF 输出直流电压波形

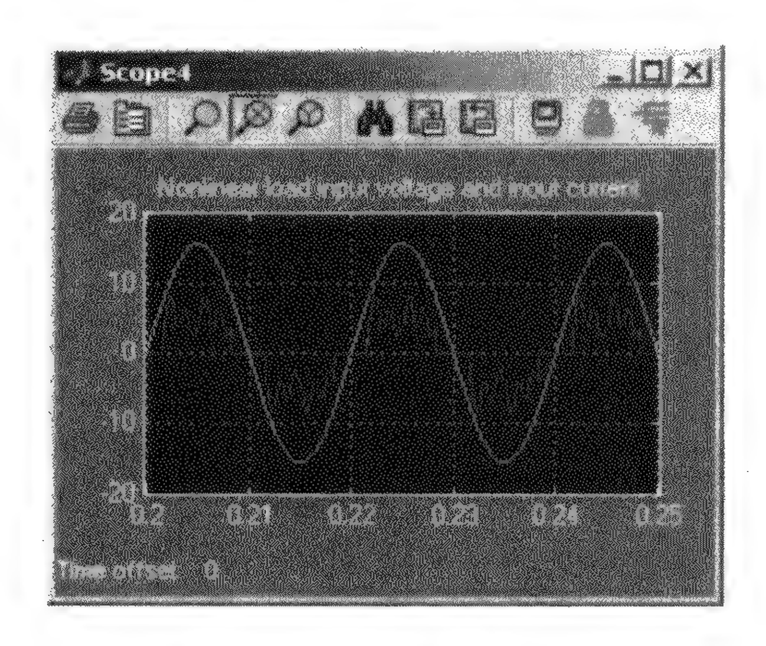


图 8-86 非线性负载输入电流与输入电压波形

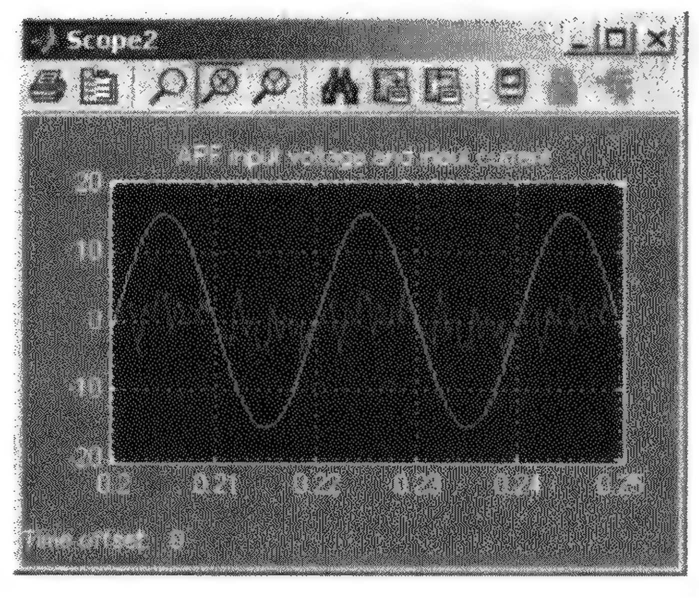


图 8-87 三相 APF 输入电压与输入电流波形

8.5.3.3 单位功率因数的三相可控整流器

参照图 8-83 所示的三相有源电力滤波器的仿真电路，去掉非线性负载部分，就得到了三相可控整流器的仿真电路，仿真电路不再提供。不失一般性，使得假负载电阻 RLC8 取值为 100Ω。

仿真结果如下：系统进入稳态后，Scope1 给出了电源输入相电压与输入电流波形，如图 8-88 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。Scope3 给出了输出直流电压波形，如图 8-89 所示，其中直流平均电压为 644V，纹波电压峰峰值为 1V。

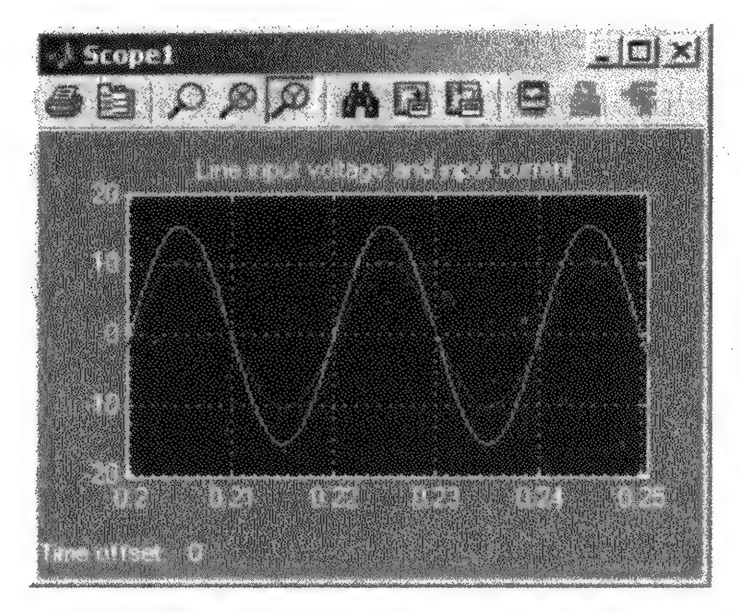


图 8-88　电源输入相电压与输入电流波形

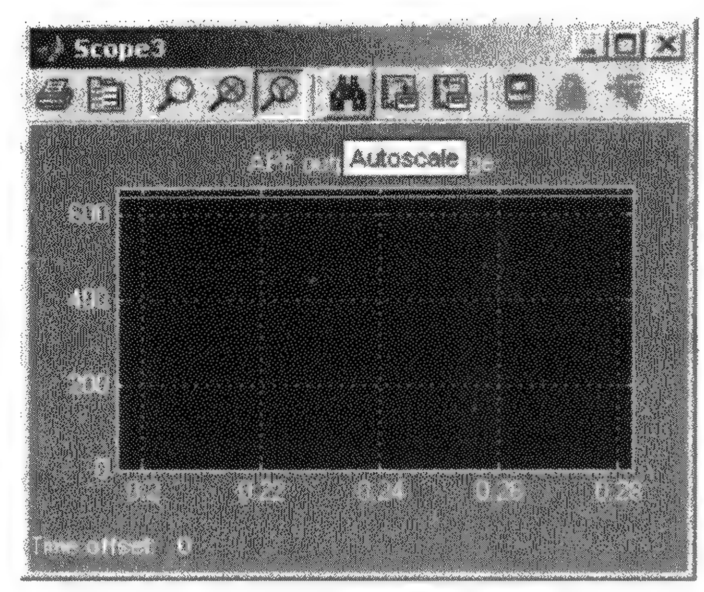


图 8-89　三相可控整流器输出直流电压波形

8.6　输入电流位移因数可调的矩阵式整流器

三相-三相矩阵变换器去掉任意一相输出部分的三个双向可控开关后，可以演化为三相-两相矩阵变流器，当期望输出频率为零时三相-两相矩阵变换器就演化为一种三相 AC-DC MC，即一种三相可控整流器，又称直流矩阵变换器，本文简称矩阵整流器（MR）。这是一种通用的降压型三相 AC-DC 变流器，能够实现四象限运行。类似传统矩阵变换器和电压源可控整流器，MR 也有其特殊的开关函数算法和输入电流空间矢量算法。本文在三相输入电压正弦且对称的条件下对 MR 的这两种算法的进行简单原理描述和仿真分析。

8.6.1　矩阵式整流器的开关函数算法

传统交流矩阵式变换器拓扑结构如图 8-90 所示，三相交流电压输入，三相交流电压输出。矩阵式整流器的拓扑结构如图 8-91 所示，三相交流电压输入，

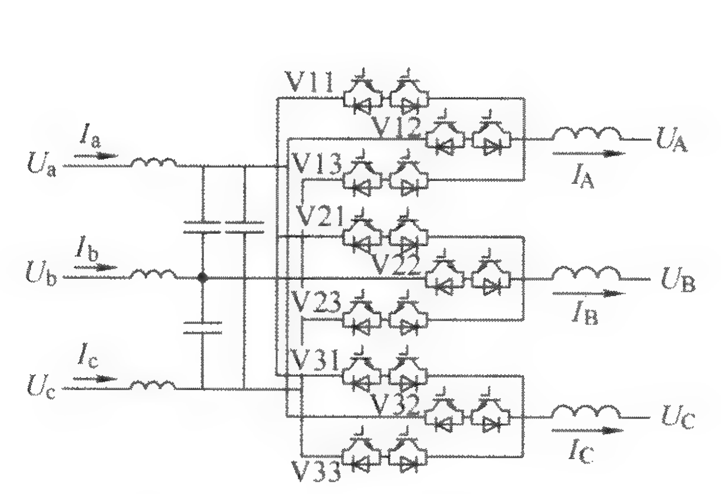


图 8-90　交流矩阵式变换器的拓扑结构

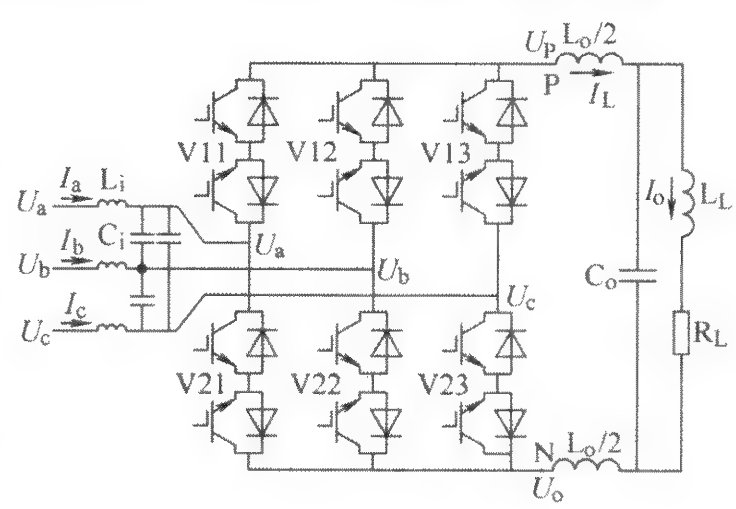


图 8-91　矩阵式整流器的拓扑结构

一路直流电压输出，也可以输出交流电压。图中均采用共发射极双向可控开关。

开关函数又称调制函数、存在函数或占空比函数，采样后的开关函数与开关周期的乘积就代表了某个功率开关的在该开关周期的导通时间，消除了调制的概念，适用于开环控制或闭环控制。

直接分析供电电压平衡且正相序时三相-三相 MC 最大输出电压增益为$\sqrt{3}/2$时的情形，设三相对称输入相电压与期望三相输出相电压方程分别为

$$\begin{bmatrix} V_{ap} \\ V_{bp} \\ V_{cp} \end{bmatrix} = V_{imp}\begin{bmatrix} \cos(\omega_i t + \varphi_{ip}) \\ \cos(\omega_i t - \alpha + \varphi_{ip}) \\ \cos(\omega_i t + \alpha + \varphi_{ip}) \end{bmatrix} \tag{8-1}$$

$$\begin{bmatrix} V_{Ap} \\ V_{Bp} \\ V_{Cp} \end{bmatrix} = V_{omp}\begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \varphi_{op}) \\ \cos(\omega_o t - \alpha + \varphi_{op}) \\ \cos(\omega_o t + \alpha + \varphi_{op}) \end{bmatrix} + \frac{V_{imp}}{2\sqrt{3}}\begin{bmatrix} \cos(3\omega_i t) \\ \cos(3\omega_i t) \\ \cos(3\omega_i t) \end{bmatrix} - \frac{V_{omp}}{6}\begin{bmatrix} \cos(3\omega_o t + 3\varphi_{op}) \\ \cos(3\omega_o t + 3\varphi_{op}) \\ \cos(3\omega_o t + 3\varphi_{op}) \end{bmatrix} \tag{8-2}$$

其中，V_{imp}与V_{omp}为正相序输入、输出相电压的幅值，φ_{ip}与φ_{op}为正相序输入、输出相电压的初相，ω_i与ω_o为正相序输入、输出相电压角频率，角位移$\alpha=120°$。设矩阵变换器的开关函数矩阵为

$$F(t) = \begin{bmatrix} f_{11}(t) & f_{12}(t) & f_{13}(t) \\ f_{21}(t) & f_{22}(t) & f_{23}(t) \\ f_{31}(t) & f_{32}(t) & f_{33}(t) \end{bmatrix} \tag{8-3}$$

其中，行$l=1, 2, 3$表示各输出相，列$k=1, 2, 3$表示各输入相，$0\leqslant f_{lk}\leqslant 1$，$\sum_{k=1}^{3} f_{lk}=1$。$f_{11}(t)\sim f_{13}(t)$、$f_{21}(t)\sim f_{23}(t)$与$f_{31}(t)\sim f_{33}(t)$分别对应图 8-90 中双向可控开关管 V11 ~ V13、V21 ~ V23 与 V31 ~ V33 的瞬时占空比，约束条件$\sum_{j=1}^{3} m_{ij}(t)=1$。可得矩阵变换器的开关函数通式为

$$\begin{aligned} f_{lk}(t) = \frac{1}{3}\{ & 1+(1+p_p)q_{vp}\cos(-\omega_m t-(k-1)\alpha+(l-1)\alpha+\varphi_{ip}-\varphi_{op})+ \\ & (1-p_p)q_{vp}\cos(\omega_s t-(k-1)\alpha-(l-1)\alpha+\varphi_{ip}+\varphi_{op})]+ \\ & \frac{7}{18}q_{vp}\cos(2\omega_i t+(k-1)\alpha+2\varphi_{ip})-\frac{1}{18}q_{vp}\cos(4\omega_i t-(k-1)\alpha+4\varphi_{ip})- \\ & \frac{1}{6}q_{vp}\cos[-(3\omega_o-\omega_i)t-(k-1)\alpha+\varphi_{ip}-3\varphi_{op}]- \\ & \frac{1}{6}q_{vp}\cos[(3\omega_o+\omega_i)t-(k-1)\alpha+\varphi_{ip}+3\varphi_{op}]\} \end{aligned} \tag{8-4}$$

式中，$\omega_m=\omega_o-\omega_i$，$\omega_s=\omega_o+\omega_i$，电压变比$q_{vp}=V_{omp}/V_{imp}$，$q_{vp}\in[0,\sqrt{3}/2]$，$q_{vpmax}=$

$\sqrt{3}/2$，输入电流位移调节因子 $P_p \in [-1,1]$。不失一般性，令 $\omega_o=0$，$\varphi_{op}=-30°$ 和 $p_p=0$，则式(8-2)简化为

$$\begin{bmatrix} V_{Ap} \\ V_{Bp} \\ V_{Cp} \end{bmatrix} = V_{omp}\begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}/2 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{V_{imp}}{2\sqrt{3}}\begin{bmatrix} \cos(3\omega_i t) \\ \cos(3\omega_i t) \\ \cos(3\omega_i t) \end{bmatrix} = q_{vp}V_{imp}\begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}/2 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{V_{imp}}{2\sqrt{3}}\begin{bmatrix} \cos(3\omega_i t) \\ \cos(3\omega_i t) \\ \cos(3\omega_i t) \end{bmatrix} \tag{8-5}$$

式(8-4)简化为

$$\begin{aligned} f_{lkp}(t) = \frac{1}{3}[&1 + q_{vp}\cos(\omega_i t - (k-1)\alpha + (l-1)\alpha + \varphi_{ip} + 30°) + \\ &q_{vp}\cos(\omega_i t - (k-1)\alpha - (l-1)\alpha + \varphi_{ip} - 30°) + \\ &\frac{7}{18}q_{vp}\cos(2\omega_i t + (k-1)\alpha + 2\varphi_{ip}) - \frac{1}{18}q_{vp}\cos(4\omega_i t - (k-1)\alpha + 4\varphi_{ip})] \end{aligned} \tag{8-6}$$

$$f_{11p}(t) = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}q_{vp}\left[\cos(\omega_i t + \varphi_{ip}) + \frac{7}{18}\cos(2\omega_i t + 2\varphi_{ip}) - \frac{1}{18}\cos(4\omega_i t + 4\varphi_{ip})\right] \tag{8-7}$$

$$\begin{aligned} f_{12p}(t) = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}q_v\Big[&\cos(\omega_i t - \alpha + \varphi_{ip}) + \frac{7}{18}\cos(2\omega_i t + \alpha + 2\varphi_{ip}) - \\ &\frac{1}{18}\cos(4\omega_i t - \alpha + 4\varphi_{ip})\Big] \end{aligned} \tag{8-8}$$

$$f_{13p}(t) = 1 - f_{11p}(t) - f_{12p}(t) \tag{8-9}$$

$$f_{21p}(t) = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}q_{vp}\left[-\cos(\omega_i t + \varphi_{ip}) + \frac{7}{18}\cos(2\omega_i t + 2\varphi_{ip}) - \frac{1}{18}\cos(4\omega_i t + 4\varphi_{ip})\right] \tag{8-10}$$

$$\begin{aligned} f_{22p}(t) = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}q_{vp}\Big[&-\cos(\omega_i t - \alpha + \varphi_{ip}) + \frac{7}{18}\cos(2\omega_i t + \alpha + 2\varphi_{ip}) - \\ &\frac{1}{18}\cos(4\omega_i t - \alpha + 4\varphi_{ip})\Big] \end{aligned} \tag{8-11}$$

$$f_{23p}(t) = 1 - f_{21p}(t) - f_{22p}(t) \tag{8-12}$$

$$f_{31p}(t) = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}q_{vp}\left[0 + \frac{7}{18}q_{vp}\cos(2\omega_i t + 2\varphi_{ip}) - \frac{1}{18}q_{vp}\cos(4\omega_i t + 4\varphi_{ip})\right] \tag{8-13}$$

$$f_{32p}(t) = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}q_{vp}\left[0 + \frac{7}{18}q_{vp}\cos(2\omega_i t + \alpha + 2\varphi_{ip}) - \frac{1}{18}q_{vp}\cos(4\omega_i t - \alpha + 4\varphi_{ip})\right] \tag{8-14}$$

$$f_{33p}(t) = 1 - f_{31p}(t) - f_{32p}(t) \tag{8-15}$$

取 A 相与 B 相输出，输出直流电压的最大值为 $V_{Ap}-V_{Bp}=\sqrt{3}\ (V_{imp}q_{vpmax})=1.5V_{imp}$。由于 C 相输出电压为零，而且 C 相无瞬时电流通过，因此矩阵整流器的开关函数矩阵可以直接取交流矩阵式变换器开关函数矩阵的前两行。其中，第一行负责产生正电压 V_{Ap}，第二行负责产生负电压 $V_{Bp}=-V_{Ap}$。令 $I_{Ap}=I_{Lp}$，根据矩阵变换原理，MR 的输入电流为

$$\begin{bmatrix} I_{AP} \\ I_{BP} \\ I_{CP} \end{bmatrix} = I_{Ap}\begin{bmatrix} f_{11p}(t)-f_{21p}(t) \\ f_{12p}(t)-f_{22p}(t) \\ f_{13p}(t)-f_{23p}(t) \end{bmatrix} = \frac{2q_{vp}I_{Lp}}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t-\alpha) \\ \cos(\omega_i t+\alpha) \end{bmatrix} \tag{8-16}$$

式 (8-16) 表明三相输入电压正相序时 MR 输入电流与输入电压完全同步。三相输入电压负相序时，有关结果需要相应调整。

8.6.2 矩阵式整流器的输入电流空间矢量算法

以三相输入电压正相序和对称平衡时供电为例，在满足输出线路不开路和输入相间不短路的换流条件下，矩阵式整流器共计有可用 9 种可用的开关组合，见表 8-2，其中前 6 种称为有效矢量，后 3 种称为空矢量或零矢量。有效矢量作用期间，有直流电压输出，即输入线电压传递到输出侧。零矢量的作用是一个开关周期内的其他时间没有电压输出，但是将输出的线间短路，实现负载续流。输入电压扇区划分如图 8-92 所示。

表 8-2 输入电压正相序时输入电流空间矢量算法基本矢量

N	U_{pn}	i_a	i_b	i_c	V11、V12、V13	V21、V22、V23	矢量
1	u_{ac}	I_{dc}	0	$-I_{dc}$	1 0 0	0 0 1	I_1
2	u_{bc}	0	I_{dc}	$-I_{dc}$	0 1 0	0 0 1	I_2
3	$-u_{ab}$	$-I_{dc}$	I_{dc}	0	0 1 0	1 0 0	I_3
4	$-u_{ac}$	$-I_{dc}$	0	I_{dc}	0 0 1	1 0 0	I_4
5	$-u_{bc}$	0	$-I_{dc}$	I_{dc}	0 0 1	0 1 0	I_5
6	u_{ab}	I_{dc}	$-I_{dc}$	0	1 0 0	0 1 0	I_6
7	0	0	0	0	1 0 0	1 0 0	I_7
8	0	0	0	0	0 1 0	0 1 0	I_8
9	0	0	0	0	0 0 1	0 0 1	I_9

假设矩阵式整流器的输入电流幅值为 I_{im}，模为 $|\vec{I}_j|=\frac{2}{\sqrt{3}}I_{im}$，输入电流矢量为 $\vec{I}_R=\sqrt{3}I_L e^{-j(\omega_i t-\varphi_i+30°)}$，合成的输入电流矢量为 $\vec{I}_R=\frac{T_\mu}{T_s}\vec{I}_\mu+\frac{T_\gamma}{T_s}\vec{I}_\gamma+\frac{T_o}{T_s}\vec{I}_o$，其中 $d_\mu=\frac{T_\mu}{T_s}=\frac{2}{\sqrt{3}}\left|\frac{\vec{I}_\mu}{\vec{I}_R}\right|\sin(60°-\theta_k)=\frac{I_L}{I_{dc}}\sin(60°-\theta_k)$，$d_\gamma=\frac{T_\gamma}{T_s}=\frac{2}{\sqrt{3}}\left|\frac{\vec{I}_\gamma}{\vec{I}_R}\right|\sin\theta_k=\frac{I_{im}}{I_{dc}}\sin\theta_k$，$d_o=1-d_\mu-d_\gamma$，$\theta_k$ 从零增加到 60°。在每个开关周期将 d_o 分成三等分，

最终各矢量作用的先后顺序为 $d_o/3$、d_μ、$d_o/3$、d_γ、$d_o/3$。当进行如下 PARKER 变换时 $\vec{I}=\frac{2}{3}(i_a+i_b\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi/3}+i_c\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi/3})=I_{im}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\omega_i t+\varphi_i)}$，MR 的两种输入电流空间矢量的基本矢量位置与扇区划分方法如图 8-93 所示，空间矢量逆时针旋转。

矩阵式整流器输出直流电压增益，即输出直流电压与输入相电压幅值之比为

$$G_V=\frac{U_{DC}}{U_{im}}=\frac{3}{2}m_c\cos\varphi_i\cdot\frac{1}{1-\omega^2L_iC_i} \tag{8-17}$$

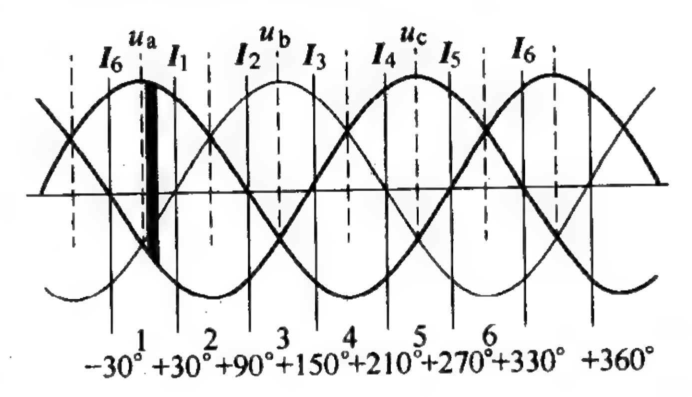


图 8-92 矩阵整流器的输入电压扇区划分

式中，L_i 与 C_i 为矩阵式整流器的输入滤波电感和电容参数，考虑到实际系统中输入滤波器的截止频率比电源频率高得多，即 $\omega^2L_iC_i\approx0$，即分式的分母不为零，分式有意义。若取 $\varphi_i=0$，$m_c=1$，则 MR 最大电压增益为 1.5，即输出直流电压的最大值为输入相电压幅值的 1.5 倍。矩阵式整流器的输出电压可看作是由输入电流角位移 φ_i 与电流调制度 m_c 控制的理想电压源；通过调节 φ_i 和 m_c，直流输出电压可由负的最大值调至正的最大值。开关函数算法和输入电流空间矢量算法的 MR 输入电流位移的调节范围可以扩大到 0 ~ 360°。令调制度 $m_c=2q_v/\sqrt{3}$，因为 $q_v\in[0,\sqrt{3}/2]$，所以 m_c 的取值范围为 0 ~ 1。显然在 m_c 不变时，调节 φ_i 大小输出电压幅值将发生改变，表明网侧无功功率的调节依赖于载侧有功功率的消耗。

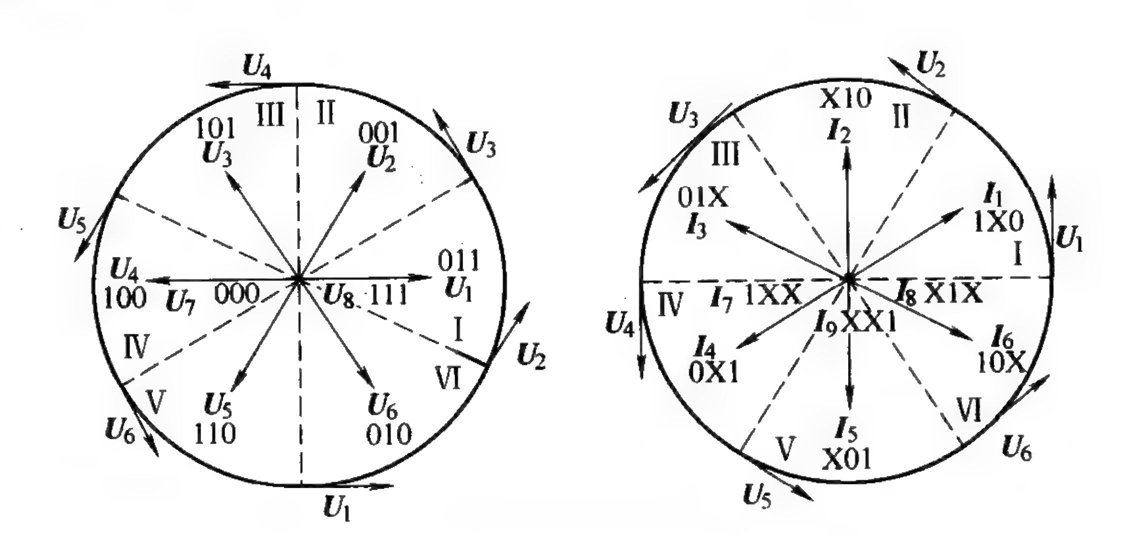


图 8-93 基本矢量位置与扇区划分方法

8.6.3 矩阵式整流器的仿真分析

根据图 8-91、图 8-92、式（8-6）和表 8-1 建立矩阵整流器两种控制算法的

SIMULINK 6.0 的仿真电路，包括功率电路和控制电路，功率电路相同，但是控制电路各不相同。其中功率电路：VS1 ~ VS3 为标准三相正弦电压源，相电压有效值为 220V。输入滤波电感 RLC1 ~ RLC3 和滤波电容 RLC4 ~ RLC6、理想功率开关是 S11 ~ S23、输出滤波电感 RLC7 和电容 RLC8、电阻电感串联负载 RLC8 组成功率电路。开关函数算法时，电感 RLC1 ~ RLC3 取值为 1mH，电容 RLC4 ~ RLC6 取值为 2.5μF。输入电流空间矢量算法时，电感 RLC1 ~ RLC3 取值为 0.2mH，电容 RLC4 ~ RLC6 取值为 15μF。电感 RLC7 取值为 5mH，RLC8 取值为 10mH/25Ω。理想功率开关为双向开关，也可以采用其他形式的双向开关。

为了实现输入电流位移的调节，可以采取两种方法：①改变代表输入电流位移的常数 phi 的取值；②改变三相输入电压的初相。第一种方法主要适用于开关函数算法，第二种方法适用于开关函数算法和输入电流空间矢量算法。设置开关频率均为 8kHz，开环控制，电压增益 $q_v = 3/4$，即 $m_c = \sqrt{3}/2$。

8.6.3.1 基于开关函数算法的矩阵式整流器

基于开关函数算法的矩阵式整流的仿真电路如图 8-94 所示。

控制电路介绍：复合器 Mux2 的输入为给定常数，其中 phi 为输入电流位移，q_v 为电压增益，ωi 为输入电压角频率，Step1 为阶跃信号，阶跃时刻为 0.1s，幅值阶跃 -1 ~ +1，-1 代表输出电压正极性，+1 代表输出电压负极性。复合器 Mux3 的输入为开关函数计算，其中 Fcn1 代表 $f_{11p}(t)$，Fcn2 代表 $f_{12p}(t)$，Fcn3 代表 $f_{21p}(t)$，Fcn4 代表 $f_{22p}(t)$。

```
Fcn1 = 0.000125 * (1/3 + (1.732/3) * u(3) * (u(5) * cos(u(4) * u(1) + u(2))
       + (7/18) * cos(2 * u(4) * u(1) + 2 * u(2)) - (1/18) * cos(4 * u(4) * u(1)
       + 4 * u(2))));
Fcn2 = 0.000125 * (1/3 + (1.732/3) * u(3) * (u(5) * cos(u(4) * u(1) -
        2 * (pi/3) + u(2)) + (7/18) * cos(2 * u(4) * u(1) + 2 * (pi/3) +
        2 * u(2)) - (1/18) * cos(4 * u(4) * u(1) - 2 * (pi/3) + 4 * u(2))))
Fcn3 = 0.000125 * (1/3 + (1.732/3) * u(3) * ( - u(5) * cos(u(4) * u(1)
        + u(2)) + (7/18) * cos(2 * u(4) * u(1) + 2 * u(2)) - (1/18) *
        cos(4 * u(4) * u(1) + 4 * u(2))))
Fcn3 = 0.000125 * (1/3 + (1.732/3) * u(3) * ( - u(5) * cos(u(4) * u(1) -
        2 * (pi/3) + u(2)) + (7/18) * cos(2 * u(4) * u(1) + 2 * (pi/3)
       + 2 * u(2)) - (1/18) * cos(4 * u(4) * u(1) - 2 * (pi/3) + 4 * u(2))))
```

Mux3 与 Mux4 之间完成比较和 6 路 PWM 的产生。

仿真结果如下：

(1)设置 $\varphi_i = 0°$，系统进入稳态后，Scope1 给出了电源 VS1 输入相电压与输入

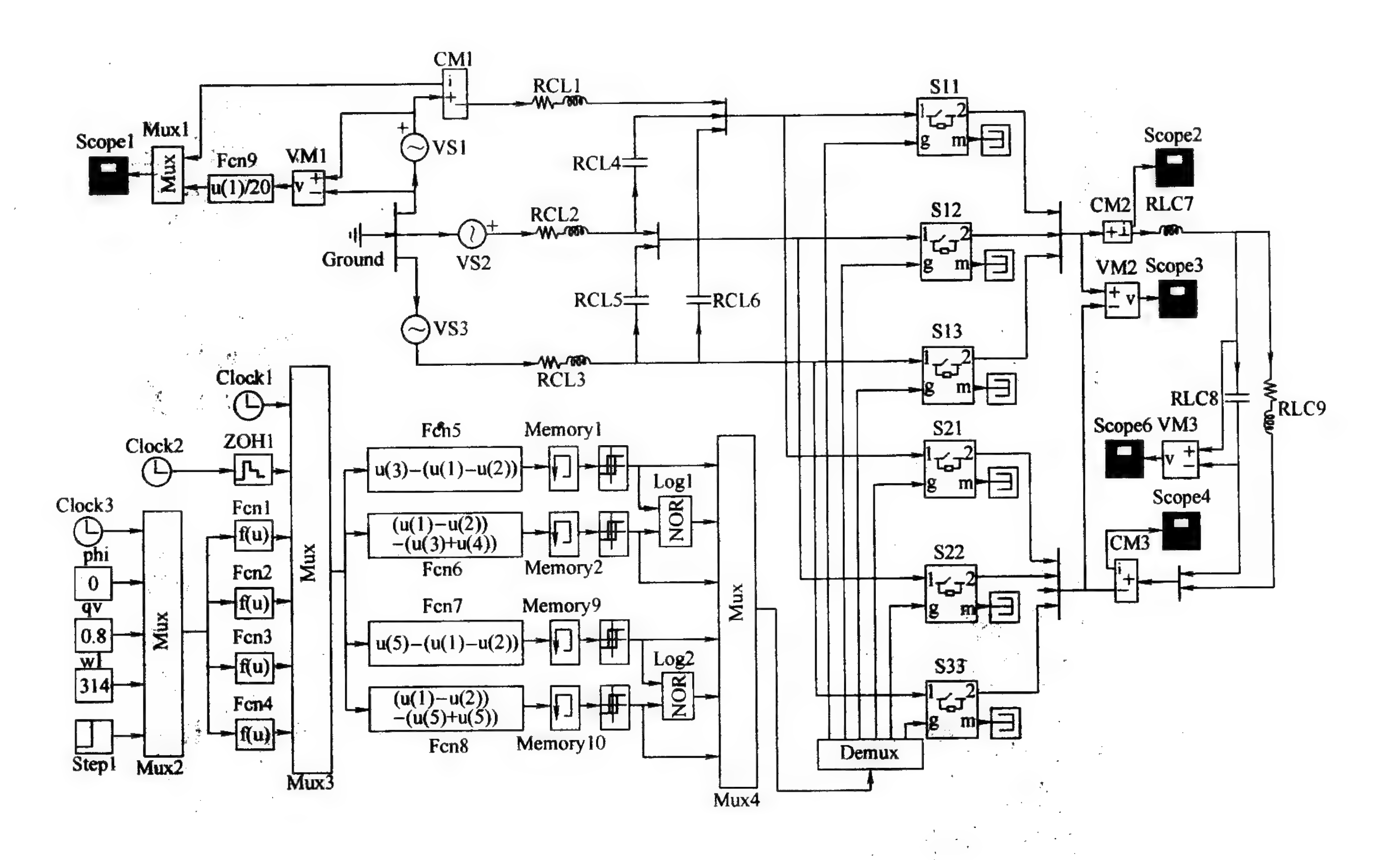


图 8-94　基于开关函数算法的矩式整流器的仿真电路

相电流波形，如图 8-95 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。

Scope3 给出了输出直流电压波形，如图 8-96 所示，其中滤波后的直流平均电压为 374V，纹波电压的最大峰峰值为 5V。

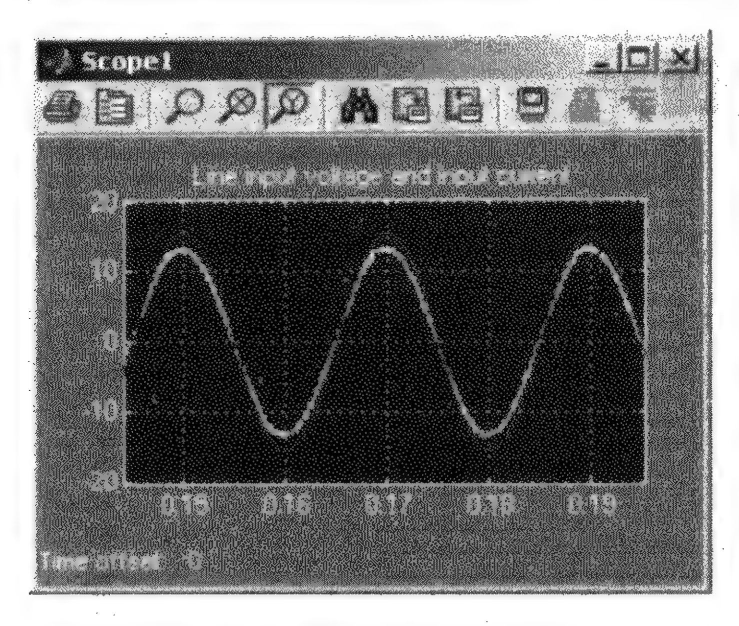


图 8-95　输入相电压与输入相电流波形（$\varphi_i = 0°$）

图 8-96　输出直流电压波形（$\varphi_i = 0°$）

（2）设置 $\varphi_i = 60°$，系统进入稳态后，Scope1 给出了电源 VS1 输入相电压与输入相电流波形，如图 8-97 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。滤波后直流平均电压为 193V，纹波电压的最大峰峰值为 5V。

（3）设置 $\varphi_i = -60°$，系统进入稳态后，Scope1 给出了电源 VS1 输入相电压与输入相电流波形，如图 8-98 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。滤波后直流平均电压为 185V，纹波电压峰峰值为 5V。

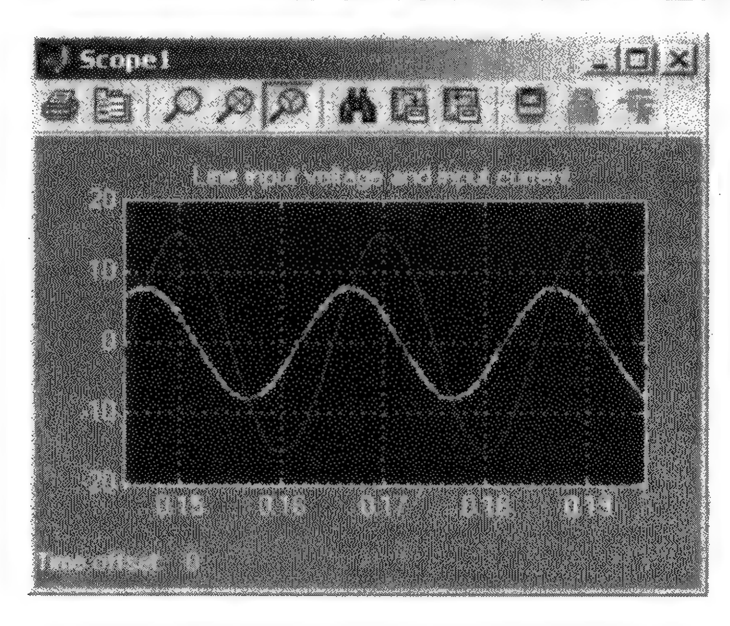


图 8-97　输入相电压与输入相电流波形（$\varphi_i = 60°$）

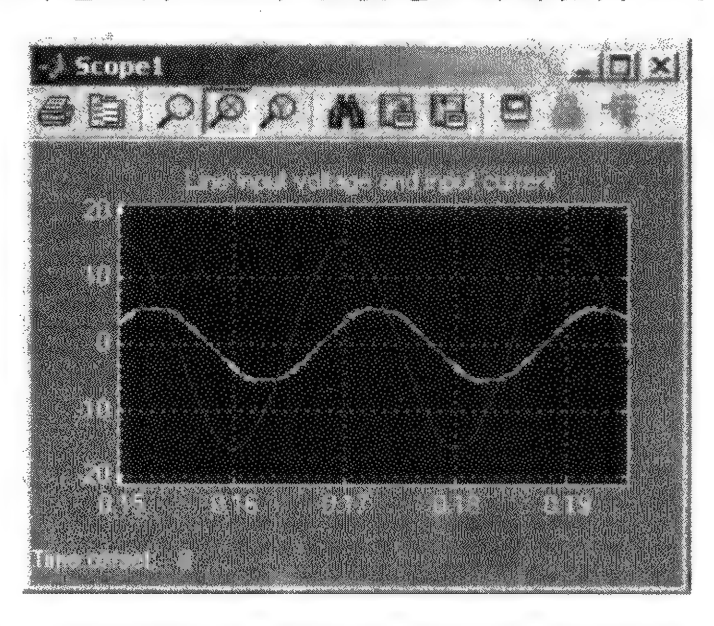


图 8-98　输入相电压与输入相电流波形（$\varphi_i = -60°$）

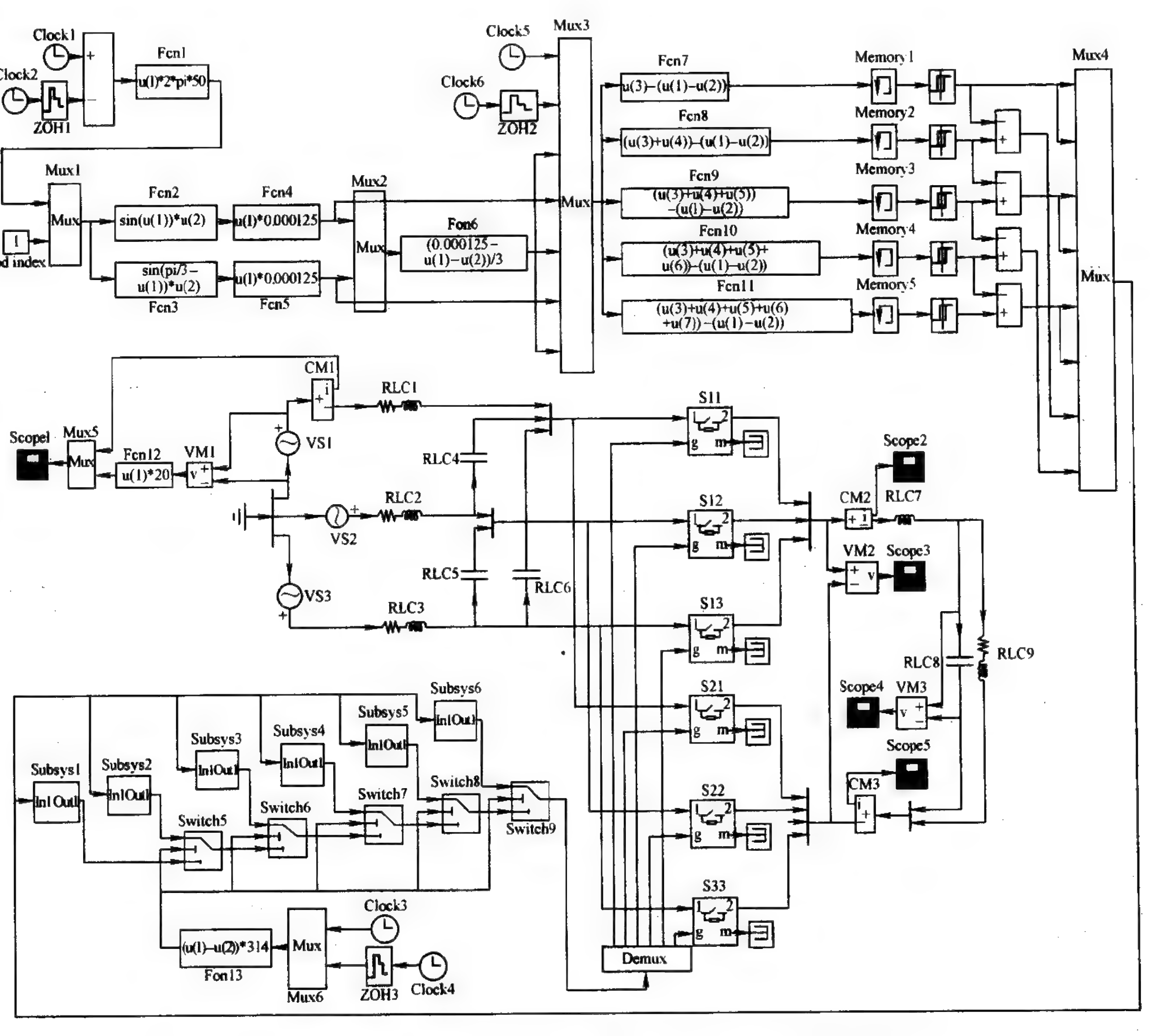


图 8-99 基于输入电流空间矢量算法的矩阵式整流器的仿真电路

8.6.3.2 基于输入电流空间矢量算法的矩阵式整流器

基于开关函数算法的矩阵式整流的仿真电路如图 8-99 所示。

控制电路介绍：复合器 Mux3 之前的环节负责计算每个开关周期的两个有效矢量的导通长度和 1/3 零矢量的作用时间长度。Mux3 与 Mux4 之间的环节负责计算 5 路中间 PWM 脉冲，Mux4 之后的环节负责确定当前处于哪一扇区和相应选择哪两个有效矢量和零矢量，适当截取 5 路中间 PWM 脉冲，形成最终的 6 路 PWM 驱动信号。扇区判断也可以采用 If block 和 Switchcase block 来构造。Subsys1 ~ 6 为子系统，各自完成 6 路不同信号的复合，其功能配置如图 8-100 所示。

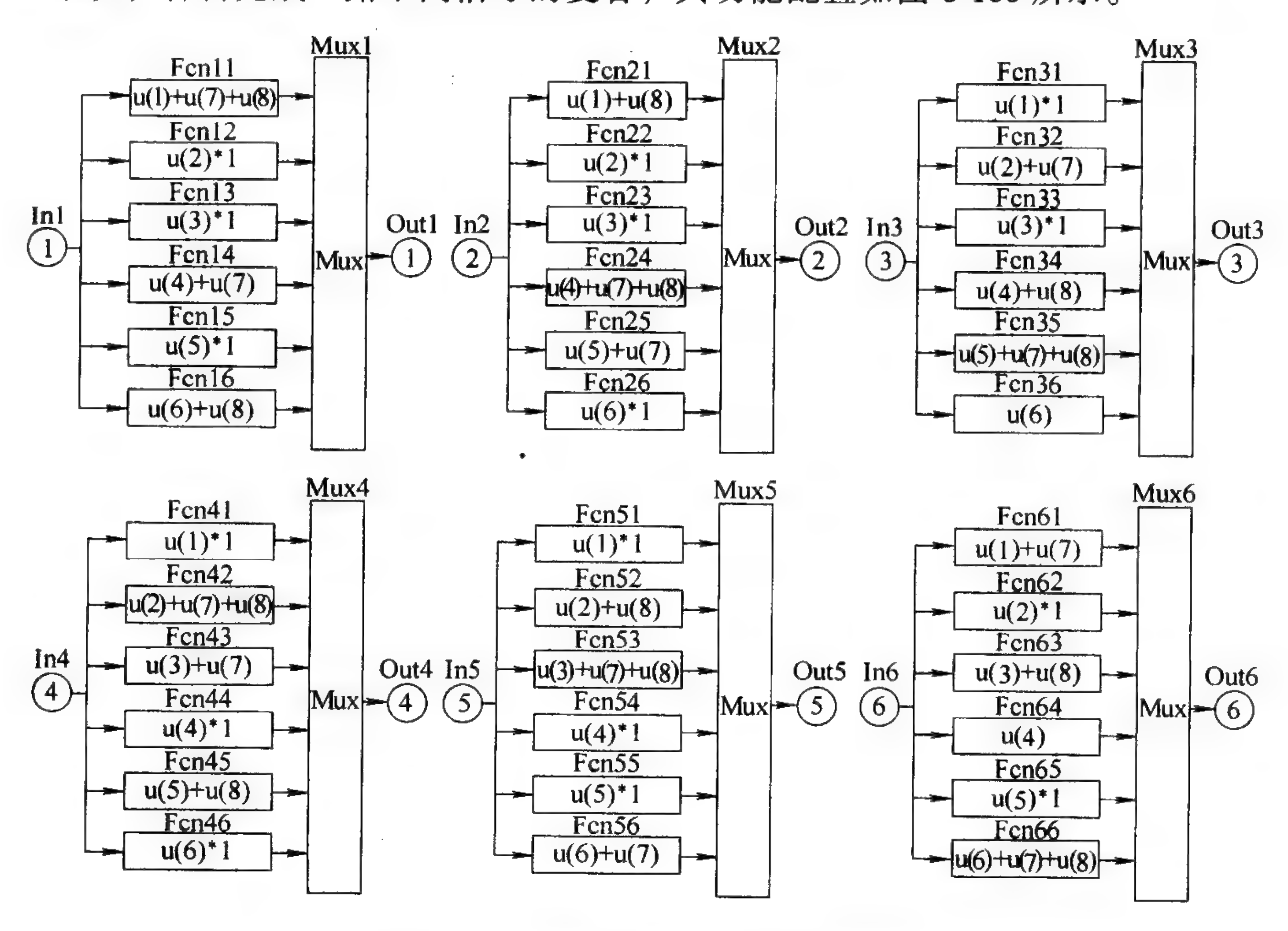


图 8-100　子系统 Subsys1 ~ 6 的功能配置

仿真结果如下：

(1) 设置 $\varphi_i = 0°$，系统进入稳态后，Scope1 给出了电源 VS1 输入相电压与输入相电流波形，如图 8-101 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。

Scope3 给出了输出直流电压波形，如图 8-102 所示，其中滤波后直流平均电压为 372V，纹波电压的最大峰峰值为 5V。

(2) 设置 $\varphi_i = 60°$，系统进入稳态后，Scope1 给出了电源 VS1 输入相电压与输入相电流波形，如图 8-103 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。滤波后直流平均电压为 193V，纹波电压的最大峰

峰值为 5V。

(3) 设置 $\varphi_i=-60°$，系统进入稳态后，Scope1 给出了电源 VS1 输入相电压与输入相电流波形，如图 8-104 所示，可见各次谐波电流均符合 IEC61000—3—2/EN61000—3—2 标准的规定。滤波后直流平均电压为 185V，纹波电压的最大峰峰值为 10V。

仿真还注意到输入滤波器后、开关电路前的电路电流为电流脉冲，其等效面积按照正弦波规律分布，经过输入滤波之后就得到了输入正弦波电流。

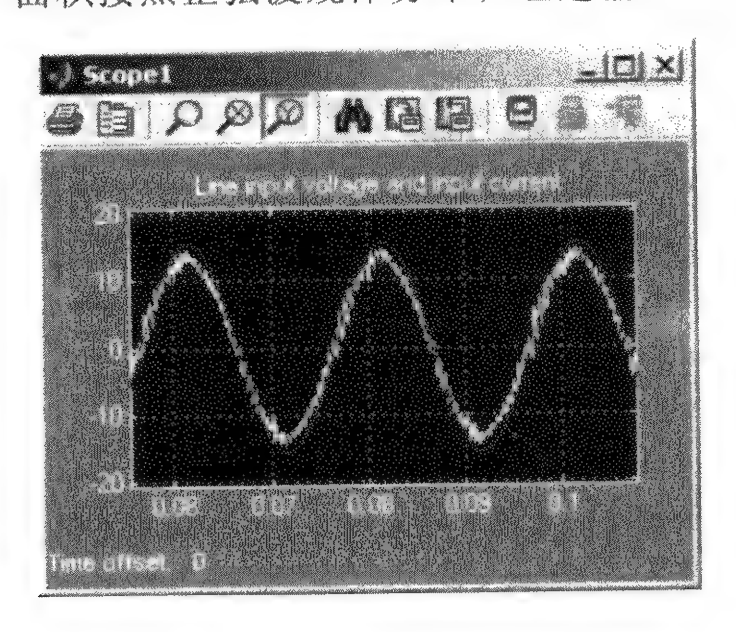


图 8-101 输入相电压与输入相电流波形（$\varphi_i=0°$）

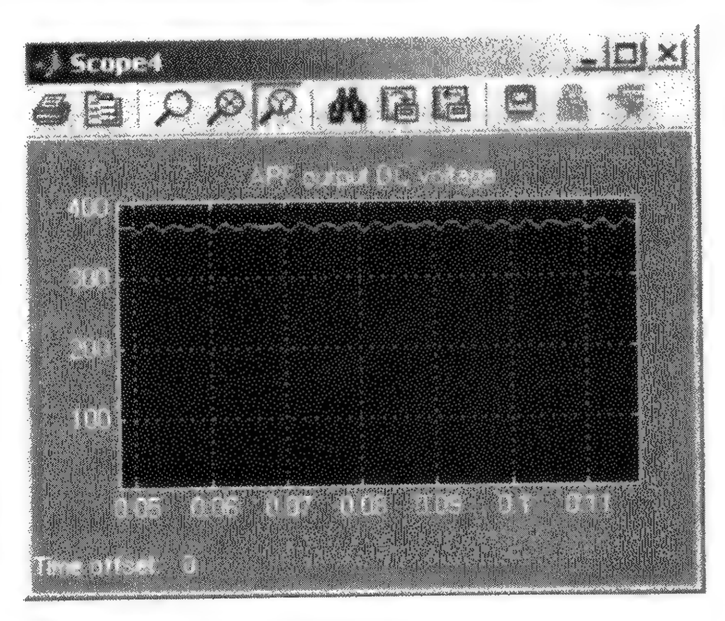


图 8-102 输出直流电压波形（$\varphi_i=0°$）

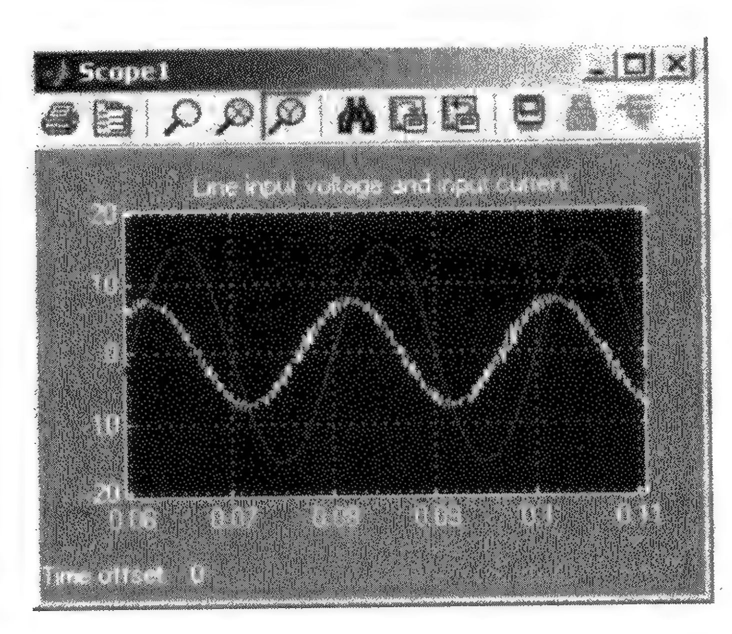


图 8-103 输入相电压与输入相电流波形（$\varphi_i=60°$）

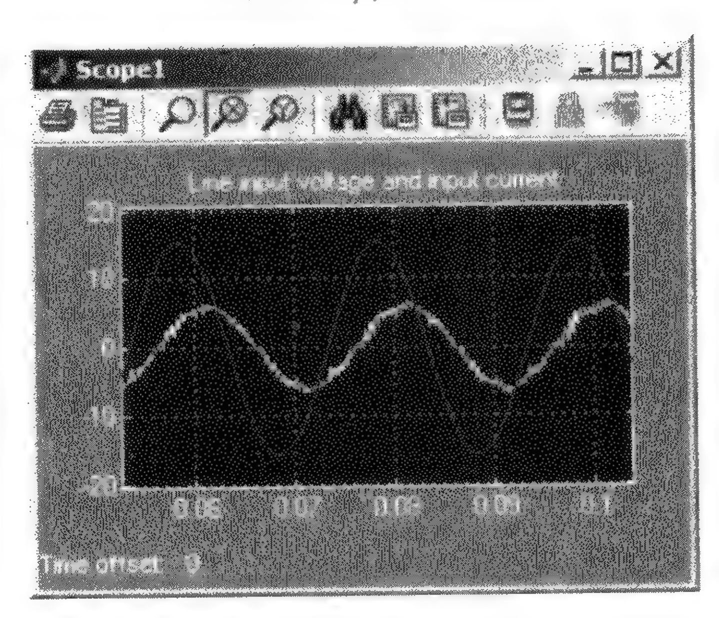


图 8-104 输入相电压与输入相电流波形（$\varphi_i=-60°$）

参 考 文 献

1 王兆安，黄俊主编．电力电子技术．北京：机械工业出版，2002

2 陈坚编著．电力电子学．北京：高等教育出版社，2002

3 陈伯时主编．电力拖动自动控制系统．北京：机械工业出版社，2003

4 陈坚编著．交流电机数学模型及调速系统．北京：国防工业出版社，1989

5 张崇巍，李汉强主编．运动控制系统．武汉：武汉理工大学出版社，2002

6 李华德主编．交流调速控制系统．北京：电子工业出版社，2003

7 胡崇岳主编．现代交流调速技术．北京：机械工业出版社，2001

8 贺益康编著．交流电机调速系统计算机仿真．杭州：浙江大学出版社，1993

9 熊光楞，沈被娜，宋安澜编著．控制系统仿真与模型处理．北京：科学出版社，1993

10 陈怀琛，黄道君编著．控制系统 CAD 及 MATLAB 语言．北京：电子工业出版社，1996

11 黄忠霖编著．控制系统 MATLAB 计算及仿真．北京：国防工业出版社，2001

12 刘金琨著．先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真．北京：电子工业出版社，2003

13 郑锦聪，庄镇嘉编著．MATLAB 进阶，哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，1999

14 薛定宇，陈阳泉著．基于 MATLAB/SIMULINK 的系统仿真技术与应用．北京：清华大学出版社，2002

15 陈怀琛，吴大正，高西全著．MATLAB 及在电子信息课程中的应用．北京：电子工业出版社，2002

16 GB/T14549—1993 电能质量公用电网谐波．北京：中国标准出版社，1994

17 GB 17625．1—1998 低压电气及电子设备发出的谐波电流限值（设备每相输人电流≤16A）．北京：中国标准出版社，1995

18 GB4343—1995 家用和类似用途电动、电热器具、电动根据以及类似电气无线电干扰特性测量方法和允许值．北京：中国标准出版社，1996

19 李晓雨．40 次以下低频对称谐波以及奇次谐波抑制器及其用途．专利号：02135217.8，公开日：2003-05-14

20 王凤翔，耿大勇．移相电抗器对变流器供电系统谐波抑制的机理研究．中国电机工程学报，2003，12（2）：54～57

21 耿大勇，王凤翔．移相电抗器变流器供电系统谐波抑制的一种新方法．辽宁工学院学报，2003，23（1）：16～20

22 陈乔夫，李达义，魏亚南．基于基波磁通补偿原理的串联型有源滤波器．华中理工大学学报，2000，28（12）：82～84

23 陈柏超，田翠华，梁柏华，王庆春．移相电抗器对变流器供电系统谐波抑制的机理研究．中国电机工程学报，2002，22（3）：63～67

24 石健将，张建国．两种三相无源功率因数校正技术的比较研究．电力电子技术，，2005，39（2）：42～44

25 姜齐荣，谢小荣，陈建业．电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用．北京：机

械工业出版社，2004

26 朱贤龙．三相交－交矩阵变换器及其在电气传动中应用的研究［D]：［博士学位论文］上海：上海大学，2002

27 杨喜军，邓超平，凌志斌，叶芃生．基于矩阵变换原理的三相可控整流器．上海交通大学学报，2004，38（8)：1291～1295.

28 阮立飞．一种三相多功能变流系统的研究：［学位论文］．上海：上海交通大学，2001

29 杨喜军．单相 AC-DC 变换器及其在家用变频空调中应用的研究：［博士后研究工作报告］．上海：上海交通大学电气工程博士后流动站，2004

30 IEC 61000—3—2：1995 "Electromagnetic compatibility Part3：limits－set.2：limits for harmonic current emission (equipment input current≤16A per phase)".

31 Oscar Garcia，Josè A. Cobos，Roberto Prieto，etc. Single Phase Power Factor Correction：A Survey. IEEE Transaction on PE，2003. 18（3)：749～755

32 Qiao，Chongming，Smedley，Keyue M. A topology survey of single－stage power factor corrector with a boost type input－current－shaper. APEC' 00，2000，1：460～467

33 Ugo Mariconi. A "bridgeless P.F.C. configuration" based on L4981 P.F.C. controller. AN 1606，ST company，pp.1－18

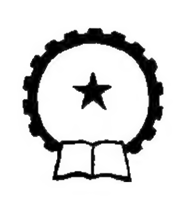
34 G. Comandatore and U. Moriconi. Designing a high power factor switching preregulator with the L4981 continuous mode. AN 628 ST Company，pp.1－23

35 Holmes D J.，Lipo T A. Implementation of A Controlled Rectifier Using AC－AC Matrix Converter Theory［J］. IEEE Trans. on Power Electronics，1992，7（1)：240～249.

36 J.B.Ejea，E. Sanchis－Kilders，J.A.Carrasco，J.M.Espi，A. Ferreres. Implementation of bi－directional AC－DC matrix converter. Electronics Letters，2002，38（16)：933～934

电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真

洪乃刚　等编著



机 械 工 业 出 版 社

前　言

20 世纪 60 年代发展起来的电力电子技术，使电能可以变换和控制，产生了现代各种高效、节能的新型电源和交直流调速装置，为工业生产，交通运输，楼宇、办公、家庭自动化提供了现代化的高新技术，提高了生产效率和人们的生活质量，使人类社会生产、生活发生了巨大变化。随着新型电力电子器件的研究和开发以及先进控制技术的发展，电力电子和电力拖动控制装置的性能也不断优化和提高，这种变化的影响将越来越大。

电力电子技术和电力拖动控制系统综合了电子电路、电机拖动、自动控制理论、微机原理和应用等多学科的知识，并且是两门实践性和应用性很强的课程。由于电力电子器件自身的开关非线性，给电力电子电路和系统的分析带来了一定的复杂性和困难，一般常用波形分析和分段线性化处理的方法来研究电力电子电路。现代计算机仿真技术为电力电子电路和系统的分析提供了崭新的方法，可以使复杂的电力电子电路、系统的分析和设计变得更加容易和有效，也是学习电力电子技术和电力拖动控制系统的重要手段。

仿真是在计算机平台上虚拟实际的物理系统。早在 20 世纪 50 年代，人们就研究利用计算机的高速计算能力来帮助设计人员进行复杂的设计，以数学模型代替实际的物理器件和装置。到 20 世纪 60 年代随着数字计算机的出现和普及、数值算法的完善，出现了大量通用的数字仿真语言及软件，并产生了控制系统计算机辅助设计软件包（CADCS），CADCS 的出现对控制系统的研究起了巨大的作用。但是使用软件包仿真对大多数用户来说还是件不容易的事情，它需要编写调用软件包的程序，要熟悉各种子程序的功能，对非专业人员来说是困难的。现代的仿真软件，各种功能的子程序已经模块化，利用这些模块就可以方便地连接成给定系统的仿真模型，使它更适合广大工程技术人员的使用，成为科研、设计人员以及学生学习的必备工具和好助手。

现在用于电力电子电路和电力拖动控制系统的仿真软件已有多种，其中最具影响的当推 PSPICE 和 MATLAB。PSPICE 是美国加州大学伯克利分校推出的集成电路分析程序 SPICE 的微机版，广泛应用于电子电路的设计。早期的 MATLAB 主要用于控制系统的仿真和分析，经过不断扩展已经成为包含通信、电气工程、优化控制等诸多领域的科学计算软件。这两个软件都有很好的人机对话图形界面和内容丰富的模型库，在近几年的版本中已经都包含了电力电子器件和电机的模型，可以用于电力电子电路和电力拖动控制系统的仿真。笔者认为，这两个软件在电力电子电路和电力拖动控制系统的仿真方面各有特点，PSPICE 的电

子元器件模型种类齐全，模型精细，使用它可以从事复杂精巧的大规模集成电路的设计和制造。MATLAB的电力电子器件使用的是宏模型，主要只是反映器件的外特性，但是它有强大的控制功能，用于系统的仿真更方便。这两者可以说是各有千秋，现在这两种软件也在互相渗透和融合，即PSPICE可以连接MATLAB，MATLAB也可以连接PSPICE。本书仿真是在MATLAB的基础上进行的，主要考虑是MATLAB在科技界使用广泛和在系统仿真上的优势。

笔者在电力电子技术和电力拖动控制系统课程的教学中逐步引入了仿真，对于加深学生对这两门课程的理解，引导学生对电力电子电路和调速控制系统的兴趣方面都起到了良好的作用。掌握了仿真的方法，当学生有一些想法和创造的灵感时，马上可以通过仿真来验证，对培养学生的创新能力无疑是很有意义的，并且可调动学生学习的积极性。实验是这两门课程的重要组成部分，学校实验室的条件毕竟是有限的，也受到学时的限制，我们在仿真的基础上开发了虚拟实验，不足的实验通过虚拟仿真来补充，仿真不受空间、时间和物质条件的限制，学生可以在课外自行上机。电力电子电路和电力拖动控制系统课程设计的结果，我们也由学生自己通过仿真来验证。仿真在促进教学改革、加强学生能力培养方面起到了积极的推动作用，仿真对广大科技工程技术工作者来说也是重要的研究和设计方法。

在这里需要指出的是，仿真也不是一蹴而就的，尽管现在有了很好的仿真软件，但要获得正确的仿真结果，需要对仿真对象有正确的理解，也就是仿真的电路和系统模型要正确，参数设计要合理，并要选择恰当的数值计算方法。在仿真中出现计算不收敛，仿真中断和不能完成模型的初始化过程的情况是常有的事，这时要仔细检查模型是否正确，参数是否合适，有时还需要对模型作一定的调整和修改。出错时软件会给出一定的参考提示，但是这种提示不一定是准确的，仿真的技巧需要在实践中不断积累和提高。

为了节省篇幅，本书对MATLAB主要只介绍与电力电子电路和电力拖动控制系统仿真有关的内容，关于MATLAB的详细知识请阅读其他文献资料，有关电力电子技术和电力拖动控制系统的原理等本书也仅作简要介绍。

本书在写作过程中得到上海大学的陈伯时教授和西安交通大学的王兆安教授的关心和支持。上海交通大学的杨喜军博士后为本书撰写了第8章“提高功率因数的电力变流电路仿真”，将他在研究工作中使用MATLAB的成果和经验介绍给大家，为本书增色不少。安徽工业大学的黄松清副教授提出了许多宝贵的建议。在此谨表衷心的感谢。

作者

2005年8月

于安徽工业大学

本书介绍了MATLAB及其图形仿真界面SIMULINK的应用基础知识，详细介绍了SIMULINK模型库的电力电子和电机模块的功能和使用，并通过大量实例介绍了电力电子电路和交直流调速系统的仿真方法和技巧。

本书可以作为高等学校电力电子技术和电力拖动自动控制系统类课程的教学辅助或选修课教材，也可供相关专业研究生和工程技术人员学习与参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真/洪乃刚等编著.—北京：机械工业出版社，2006.1

ISBN 7-111-18042-9

Ⅰ.电… Ⅱ.洪… Ⅲ.电力传动-控制系统-计算机仿真-计算机辅助计算-软件包，MATLAB Ⅳ.TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第146011号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
责任编辑：林春泉 徐明煜 版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣
封面设计：陈 沛 责任印制：杨 曦
北京机工印刷厂印刷
2006年1月第1版第1次印刷
1000mm × 1400mm B5·8.625印张·333千字
0 001—4 000册
定价：23.00元